

**EVALUACIÓN TERMOENERGÉTICA DE UN SISTEMA DE
REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN IMPLEMENTANDO UN
BIODIGESTOR ANAERÓBICO**



SAMUEL IVAN BONILLA GRACIA

CARLOS ANTONIO MEDELLIN MESTRA

DIRECTOR

Ing. JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO, Ph. D

CODIRECTOR

Blg. DIANA MARCELA OSSA HENAO, M.Sc. Ph. D

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA - CORDOBA

2019

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO

Director

RAFAEL DAVID GÓMEZ VÁSQUEZ

Jurado

ARNOLD RAFAEL MARTINEZ GUARIN

Jurado

DEDICATORIAS

Primero que todo este trabajo se lo dedicamos a Dios ya que sin el nada es posible.

Les dedicamos a nuestros nuestros compañeros de la carrera que siempre estuvieron presentes todos los días, sin ustedes esto no sería realidad.

Le dedicamos este trabajo a la Universidad de Córdoba que nos brindo la mejor experiencia de nuestra vida hasta ahora.

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

Los autores agradecen a la Universidad de Córdoba como fuente de financiación, en el marco de la Convocatoria Interna de proyectos de investigación enmarcada en la Sostenibilidad de los Grupos de investigación año 2017, “Acta No. FI-05-17 de 2019”.

Agradecemos a nuestras madres y padres respectivamente Carola del Carmen Gracia Herrera, Yasmín del Socorro Mestra Pérez, Dagger Iván Bonilla Vargas y Cristóbal Antonio Medellín Burgos. Porque nos acompañaron durante estos años en nuestras carreras universitarias, por apoyarnos en los momentos difíciles y especialmente en los momentos que nos sentíamos frustrados por los obstáculos que se presentan no solo en la carrera universitaria sino en la vida.

Además de todo el personal docente que nos acompañó durante nuestra etapa en la universidad, especialmente a los Ingenieros Jorge Mario Fandiño, Elkin Medellín, Jaime Villada, Jesús Rhenals, Juan Fernando Arango, Rafael Gómez y Arnold Martínez, que nos ayudaron en la planificación, desarrollo y resultados y evaluación del proyecto de grado. Por sus consejos y ayudas, ya que sin su apoyo este proyecto no hubiese sido real. Ante todo, agradecerle a cada uno de ellos, porque nos dieron lo mejor de sí mismos. brindándonos la oportunidad de transformar nuestros sueños de ser ingenieros mecánicos en un objetivo para ayudar a nuestra familia, amigos, Montería, Córdoba y Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

RESUMEN

ABSTRACT

1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REVISIÓN DE LITERATURA	17
3.1. BIOMASA	17
3.2. MATERIAL ORGÁNICO	17
3.3. LOS BIODIGESTORES	21
3.3.1. Clasificación de Biodigestores Anaerobios	22
3.3.1.1. Biodigestores de flujo discontinuo.....	22
3.3.1.2. Biodigestores de flujo semicontinuo.....	22
3.3.1.3. Biodigestor de flujo continuo	23
3.3.1.4. Biodigestores con agitación	23
3.4. PROCESO DE BIODIGESTIÓN.....	23
3.5. APLICACIONES DE LOS BIODIGESTORES.....	29
3.6. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN	30
4. MATERIALES Y MÉTODOS	33
4.1. MATERIALES	33
4.2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	34
4.3. DISEÑO Y CONSTRUCCION.....	37
4.4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	46
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
6. CONCLUSIONES	60
7. RECOMENDACIONES	64
8. BIBLIOGRAFÍA	67
9. ANEXOS.....	70

LISTADO DE TABLAS

TABLA	Pág.
1. Composición química del biogás.....	19
2. Temperatura y tiempo biodigestión.....	23
3. Ventajas de la relacion Carbono-Nitrogeno.....	25
4. Contenido de materia orgánica en cada reactor	49
5. Porcentaje de metano para biogás y gas patrón	52
6. Composición del biogás de muestra H70-CR30.....	55
7. Composición del biogás de muestra H100.....	55
8. Composición del gas patron	56
9. Propiedades del gas patron	56
10. Balance estequiométrico para la combustion del biogás.....	57
11. Propiedades de la combustión del biogás obtenidas por el software.....	57
12. Temperaturas para el funcionamiento de sistemas de refrigeración.....	59

LISTADO DE FIGURAS

Figura	Pág.
1. Proceso de transformacion de material organico en biogas y abono	18
2. Produccion de biogás-material volátil	21
3. Dependencia de pH de la actividad metanogénica	25
4. Esquema de proceso de biodigestión.....	27
5. Esquema de un ciclo de refrigeración por absorción	31
6. Tanque de refrigerante 410a.....	32
7. Tubos de acero estructural.....	32
8. Motor 1 hp	33
9. Nevera por absorcion	33
10. Termocuplas tipo K.....	34
11. Manómetro de 60 psi.....	35
12. balanza digital.....	35
13. Baker 2 litros.....	36
14. sistema de adquisición de datos.....	36
15. pHmetro digital.....	37
16. Cromatografo de gases.....	37
17. Diagrama de cuerpolibre cilindro-rodillo plano X-Y	40
18. Diagrama de fuerza y momento del cuerpo cilindro-rodillo plano X-Y	40
19. Diagrama de cuerpolibre cilindro-rodillo plano X-Z.....	41
20. Diagrama de fuerza y momento del cuerpo cilindro-rodillo plano X-Z.....	41
21. Especificaciones de rodamiento seleccionado	44
22. Tipo de banda A-66 seleccionada	45
23. Parte critica y soldadura seleccionada E6011	46
24. Contenido ruminal y heces bovinas respectivamente	47
25. Carga del biodigestor	38

26. Monitoreo del proceso de biodigestión	49
27. Grafica de tiempo en días y presión en psi	51
28. Grafica de los pH registrados durante la prueba de producción	52
29. Grafica de pH comparativa	52
30. Registro de las temperaturas dentro del sistema	53
31. Grafica de Temperatura comparativa	644
32. Muestra de evolucionaron del Biogás en el quemador de la nevera.....	58
33 Resultados de la prueba del biogás	58
34. Aproximación lineal para la gráfica tiempo temperatura	60
35. Selección de producción referente a la figura.....	65

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Sistema de agitación por rodillos.....	70
Anexo 2. Tanques de biodigestión.....	70
Anexo 3. Recolección del material orgánico en las instalaciones de frigosinu s.a.....	70
Anexo 4. Datos de la masa y volúmenes tomados durante la carga de los tanques.....	71
Anexo 5. graficas de las cromatografías.....	71
Anexo 6. Prueba de combustión de biogás.....	71
anexo 7. Planos del diseño.....	73
Anexo 8. Diagrama de transmisión de potencia del motor.....	74

RESUMEN

En la actualidad es de gran interés el estudio de energías renovables entre ellas la biomasa. El departamento de Córdoba-Colombia es conocido por ser una región de alta producción ganadera, producto de estas actividades se genera residuos como son las heces y contenido ruminal bovino. En este proyecto de investigación se evaluó el gas generado en un biodigestor rotativo durante un periodo de producción de 41-45 días, este se diseñó mediante un montaje sobre rodillos impulsados por un motor utilizando un sistema de transmisión por bandas y poleas con capacidad para tres biodigestores de manera simultánea y además permite monitorear las variables de presión, temperatura y pH durante el proceso de biodigestión, también cuenta con un visor para monitorear el aspecto de la biomasa durante el proceso.

Se realizaron dos pruebas para comparar la producción de biogás obtenido para una muestra de 100% heces bovinas (H100) y para mezcla de heces con contenido ruminal a una relación de 70% heces y 30% contenido ruminal (H70-CR30), de la producción de biogás tuvimos que la muestra H70-CR30 tuvo una mayor producción que la muestra H100 (100% heces), lo cual se mantuvo durante todo el periodo de prueba, además se realizó una cromatografía a los gases producidos lo cuales mostraron que para los biodigestores con la muestra H70-CR30 se obtuvieron porcentajes de metano (CH_4) mayores que para la H100 además se analizó el gas y la combustión empleando el software ASPEN HYSYS donde se determinaron propiedades como poder calorífico y temperatura de flama adiabática y al final se comparó los resultados con otros combustibles similares. Con el biogás producido se empleó como combustible para un sistema de refrigeración por absorción agua-amoniaco, donde se encontró que el quemador del equipo no era

compatible con el biogás por lo que se quemó a través de una conexión externa diferente en el mismo sitio del quemador y se evaluó la temperatura del generador utilizando un sistema de adquisición de datos para verificar que este alcanzara la temperatura de operación para separar la mezcla de agua amoníaco.

Palabras clave: contenido ruminal, Biomasa, biodigestor, biogás, combustión, ASPEN HYSYS, refrigeración, absorción, temperatura de operación.

ABSTRACT

Currently there is great interest in the study of renewable energy, including biomass. The department of Córdoba-Colombia is known for being a region of high livestock production, as a result of these activities waste is generated such as feces and bovine ruminal content. In this research project, the gas generated in a rotary biodigester during a production period of 41-45 days was evaluated, this was designed by mounting on rollers powered by a motor through a belt and pulley transmission system with capacity for three biodigesters simultaneously and also allows monitoring the variables of pressure, temperature and pH during the biodigestion process, it also has a display to monitor the appearance of the biomass during the process.

Two tests were carried out to compare the biogas production obtained for a sample of 100% bovine feces (H100) and for a mixture of feces with rumen content at a ratio of 70% feces and 30% rumen content (H70-CR30), from the biogas production we had that the H70-CR30 sample had a higher production than the H100 sample (100% faeces), which was maintained throughout the test period, in addition a chromatography was carried out on the gases produced which showed that for the Biodigesters with the H70-CR30 sample obtained higher percentages of methane (CH_4) than for the H100. In addition, the gas and combustion were analyzed using the ASPEN HYSYS software where properties such as calorific value and adiabatic flame temperature were determined and compared with others similar fuels.

With the biogas produced, it was used as fuel for a water-ammonia absorption refrigeration system, where it was found that the burner of the equipment was not

compatible with the biogas, so it burned through a different external connection at the same site of the burner and the generator temperature was evaluated using a data acquisition system to verify that it reached operating temperature to separate the mixture of ammonia water.

Key words: ruminal content, Biomass, biodigester, biogas, combustion, ASPEN HYSYS, refrigeration, absorption, operating temperature.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de energías renovables es una forma de disminuir el impacto ambiental ocasionado por el uso de los combustibles fósiles, pero también brinda la posibilidad de darle un mejor aprovechamiento a recursos como la biomasa, donde, mediante los biodigestores es posible darle un valor agregado al material orgánico producto de actividades como la ganadería y la agricultura, para residuos producidos durante la crianza y en la cadena de producción lechera que generan como subproducto heces fecales, y en la producción de carne donde se obtiene como residuo el contenido ruminal luego del sacrificio, además la integración de una planta de biogás puede aumentar significativamente la productividad de las granjas sin ganado además de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Siddiqui et al., 2020).

En el departamento de Córdoba se caracteriza por un fuerte sector ganadero, pues representa el 10% del hato ganadero nacional y el 30% del regional (Economía Regional y Urbana, Banco de la República). El aprovechamiento de residuos producto de estas actividades, la biodigestión tiene aplicaciones desde fuente energética para zonas no interconectadas (ZNI) hasta a nivel grandes ganaderías y aplicaciones industriales, en las que se obtiene un biogás con alto contenido de metano (CH_4) con aplicaciones desde cocinas hasta motores y para este trabajo en sistemas de refrigeración por absorción, por lo que nos centramos el estudio de esta fuente de energía.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño termo-energético de un sistema de refrigeración por absorción empleando un biodigestor anaeróbico, para su uso en zonas no interconectadas del departamento de Córdoba.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros para el diseño de un biodigestor y su implementación en un sistema de refrigeración por absorción.
- Evaluar las principales variables químicas, orgánicas y termodinámicas de la materia orgánica con presencia en el departamento Córdoba para la selección de la materia orgánica.
- Diseñar un biodigestor y sus elementos auxiliares de manera que pueda ser acoplado a un sistema de refrigeración por absorción.
- Evaluar el funcionamiento del proceso de refrigeración usando biogás como fuente de energía.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. BIOMASA

La biomasa es la energía almacenada en los tejidos de planta y animales, que pueden ser empleados como combustible. La biomasa se considera uno de los principales recursos en la tierra, algunos cálculos estiman solo se aprovecha el 1% del total de la radiación solar incidente anual de la cual se produce mediante fotosíntesis, cerca de $2,2 \times 10^{11}$ toneladas de biomasa (en base seca), lo que equivale a 2×10^{15} MJ, es decir, más de diez veces la energía consumida durante un año en la tierra. (López G., 2008, pág. 13). Si bien no es posible aprovechar todo este potencial energético si es posible aumentarlo mediante el avance en las tecnologías para el uso y aprovechamiento de esta la biomasa, además de proporcionar sustento para plantas y animales, también se utiliza en la mayoría de los materiales hechos por el hombre, como las telas, medicamentos, productos químicos y materiales de construcción. Además la biomasa es una de las principales fuentes históricas de energía desde el descubrimiento del fuego, cuando se usaba para generar calor (Gevorkian, 2010), (Taviz, 2010).

3.2. MATERIAL ORGÁNICO

son el producto de las actividades agrícolas ganadera, pecuaria, entre otras, las cuales producen materia orgánica que pueden ser transformada en biogás implementando biodigestores anaerobios (Acevedo 2006), Otras materia orgánica como la de origen animal también pueden emplearse como base para obtener biogás y bioabono (Álvarez et al., sf; Torres & Follari, sf 2006), los diferentes tipos de materiales orgánicos como paja,

pasto y desechos de verdura, pueden fermentarse anaeróbicamente debiendo previamente triturarse para evitar la formación de capa flotante y dar un tratamiento especial procesos donde se realiza una sola carga hasta que el material cumpla su ciclo de producción (Vargas 1992; Ramón et al. 2006) (El, n.d.).

Digestión anaeróbica: es un proceso microbiológico en ausencia de oxígeno, en el que la materia orgánica se transforma mediante la acción de microorganismos a través de 4 etapas para producir biogás y un residuo aprovechable como bioabono (Yank et al., sf), en la digestión anaeróbica se presentan procesos de origen bioquímico producto del metabolismo de microorganismos en los que algunos se oxidan y forman CO_2 y otros se reducen formando metano CH_4 (Guevara 1996). El proceso anaeróbico ocurre en cuatro pasos que ocurren de forma continua hidrólisis, acidogénesis, acetanogénesis, y metanogénesis (Vargas 1992; Guevara 1996; Hilbert 2003) (Ramón et al. 2006).

El procesos de digestión anaeróbica atraviesa por las siguientes etapas, primero los sustratos complejos mediante hidrolisis se transforman a sustancias solubles más simples como azúcares grasas y aminoácidos gracias a enzimas de las bacterias para luego pasar a la etapa de acidogénesis en la que estos se fermentan en ácidos volátiles como el Ácido Acético, Propiónico y Butírico, Hidrogeno y CO_2 , luego transcurre la etapa de acetanogénesis donde los ácidos butírico y propiónico se oxidan por acción de bacterias acetilénicas, por último se da un proceso de digestión intensiva de las bacterias metanogénicas, en esta etapa se produce metano en gran mayoría y CO_2 .

Otro elemento muy importante en la producción del biogás, son los biodigestores pueden considerarse como un tanque hermético el cual contiene un material orgánico que en

condiciones favorables de pH, temperatura y humedad, pasa por un proceso de digestión anaeróbica donde microorganismos produce un gas combustible compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) véase tabla 1, la materia orgánica permanece por un periodo de tiempo en el biodigestor mientras transcurre el proceso de digestión y luego pasa a convertirse en abono orgánico como lo muestra la figura 1.



Figura 1. proceso de transformación de material orgánico en biogás y abono orgánico

Fuente: propia.

Tabla 1: Composición química del biogás

componente	Composición aproximada en %
Metano (CH ₄)	60-70
dióxido de carbono (CO ₂)	30-40
Hidrogeno (H ₂)	1.0
Nitrógeno (N ₂)	0.1
Monóxido de carbono (CO)	0.1
Oxigeno (O ₂)	0.1
Ácido sulfúrico (H ₂ S)	0.1

Fuente: (Botero & Preston 1986)

El biogás resultado del proceso de digestión anaerobia se produce de 400 a 700 litros de gas por cada kilogramo de materia volátil transformada, según sean las características de la materia orgánica. El biogás posee un poder calorífico que suele oscilar de 4,500 a 5,600 kcal/m³. El poder calorífico del biogás lo determinas la concentración de metano el cual tiene un poder calorífico de 8,500 kcal/m³ (Alejandro Bautista Buhigas, 2010), ver figura 2.

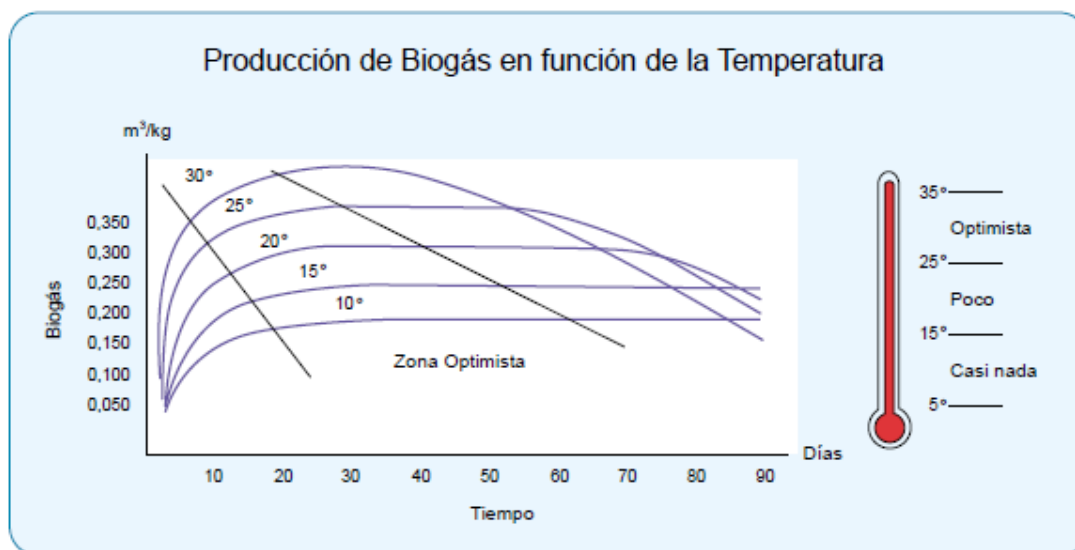


Figura 2 Producción de biogás m^3/kg material volátil

Fuente: Manual del biogás pag.40

La biodigestión se da en ausencia de oxígeno, para estabilizar la materia orgánica por conversión en metano y otros productos inorgánicos incluyendo dióxido de carbono. M.O. + $H_2O \rightarrow CH_4 + CO_2$ + nueva masa + $NH_3 + H_2S$ + calor (Eva Patricia Tavizón Alvarado 2010), una de la principal reacción durante el proceso es la fermentación anaeróbica de la materia a causa de los microorganismos metano génicos $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4 + 34.4$ calorías (Alejandro Bautista Buhigas 2010).

3.3. LOS BIODIGESTORES

Conocidos también o de biogás, son depósitos o tanques herméticos donde la materia orgánica como heces, fangos, residuos alimenticios, agrícolas o aguas residual se descomponen durante un periodo de tiempo y generan biogás y bioabono (Yank et al., sf, Pedraza et al. 2002; Ramón et al. 2006), Los biodigestores permiten generar un gas combustible compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, el cual se

genera mediante un proceso de digestión anaeróbico, las aplicaciones del gas son muy diversas desde combustible para las estufas de los hogares e motores calefacciones entre otras.

3.3.1. Clasificación de Biodigestores Anaerobios

Los biodigestores se pueden clasificar de diferentes maneras entre ellas por el tipo de carga y proceso.

3.3.1.1. Biodigestores de flujo discontinuo

A este tipo de proceso también se le conoce como biodigestión por batches donde la carga de trabajo se agrega al inicio en su totalidad y no se altera hasta el final del proceso cuando se da la descarga, generalmente son más costosos y requieren más mano de obra, además en algunos casos es necesario almacenar la materia orgánica para el proceso en los periodos entre cargas.

3.3.1.2. Biodigestores de flujo semicontinuo

la carga del material a orgánico se agrega en periodos de tiempo discretos por ejemplo cada 12 horas, una vez al día o cada dos días durante todo el proceso, por lo general requieren de menos mano de obra, además requiere de una mezcla de material orgánico más fluida y de un depósito de gas o un sistema de almacenamiento si este no se utiliza en su totalidad de manera continua.

3.3.1.3. Biodigestor de flujo continuo

la carga es continua al igual que el proceso de biodigestión se caracteriza por que se realiza en grandes cantidades empleando un contenedor de gran tamaño, además cuentan con una pendiente que favorece la entrada y salida de la materia orgánica por diferencia de nivel.

3.3.1.4. Biodigestores con agitación

La agitación en los biodigestores consiste en crear una mezcla uniforme de la materia orgánica que permita mejorar las condiciones químicas, y biofísicas en el interior del digestor, siendo lo más importante mantener una temperatura uniforme en la materia orgánica para evitar gradientes internos, además de minimizar la producción de agentes tóxicos y favoreciendo la dispersión de los mismos. No obstante estudios demuestran que la agitación para mezclas acuosas con baja concentración de material orgánico, no presenta un incremento notable en la producción de biogás, sin embargo, para altas concentraciones de materia orgánica diluida la agitación generó un incremento en la producción de biogás de alrededor de un 15% bajo condiciones experimentales (Sánchez et al., 2016).

3.4. PROCESO DE BIODIGESTIÓN

La biomasa: es la energía química almacenada en los cuerpos, proveniente del almacenamiento fotosintético de la energía del sol realizada directamente por los organismos autótrofos, transformada mediante el proceso fotoquímico de fotosíntesis en la materia orgánica que constituye primordialmente las plantas, además esta es tomada de las plantas por los animales y otros seres vivos además esta energía puede ser transformada

mediante procesos químicos o termoquímicos transformando las moléculas y cadenas orgánicas.

Según sea el nivel la biomasa puede clasificarse en primaria, que es la directamente producida por la fotosíntesis, y secundaria, que son las transformaciones de esa biomasa entre ellas las generadas por los animales.

El biogás es una mezcla de gases, principalmente metano (CH_4) generalmente en mayor proporción y dióxido de carbono (CO_2) entre los cuales conforman alrededor del 99% del gas producido, al descomponerse de forma anaeróbica o sin oxígeno.

Los procesos anaeróbicos son muy dependientes de la temperatura y al aumentar esta se aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos que intervienen en el proceso generando mayor cantidad de biogás, además influye en el tiempo de retención de la materia orgánica como lo muestra la tabla 2 en donde se muestran los tres rangos de temperatura psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C) (Varnero et al., 2011)

Tabla 2: temperatura y tiempo biodigestión

Fermentación	Mínimo	óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psycrophilica	4-10 °C	15-18 °C	20-25 °C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35 °C	35-45 °C	30-60 días
Thermophilica	25-45 °C	50-60 °C	75-80 °C	10-15 días

Fuente: (Varnero, 2011, pag 39)

El rango mesofílico de operación es el más utilizado, a pesar de que en la actualidad se está implementando cada vez más el rango termofílico, para aumentar la eficiencia del proceso.

Tiempo de retención: el tiempo de retención se refiere al tiempo que las bacterias requieren para degradar la materia orgánica y uno de los principales puntos a tener en cuenta para el diseño además volumen de materia orgánica y está estrechamente relacionado a la temperatura. Otro aspecto a tener en cuenta es si es estacionario o si es de carga continua, este va a determinar el volumen diario de carga que será necesario para alimentar al digestor, y en general se calcula con la siguiente ecuación para biodigestores de carga continua:

$$\text{Volumen de carga diario } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) = \frac{\text{volumen del digestor (m}^3\text{)}}{\text{tiempo de retencion (días)}} \quad \text{Ec. 1}$$

pH Óptimo: este parámetro determina la inhibición o toxicidad de las bacterias metanogénicas para las cuales el pH debe estar entre 6.5 y 7.5. (Olaya & Gonzales 2009), para los que pH ácidos inferiores a 6 presentan un contenido pobre de metano, por tanto, tiene menor poder calorífico. Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso es vital mantener un pH neutro (Varnero 2011, pág. 43). Esta relación se puede ver en la figura 3.

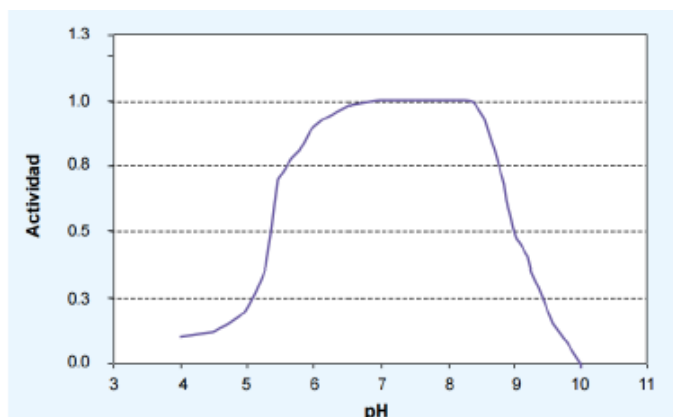


Figura 3: Dependencia del pH de la actividad metano génica.

Fuente: Manual del biogás, pág. 44

Relación carbono – nitrógeno (C/N): es un valor que nos permite apreciar la composición de la biomasa y si esta es adecuada para la biodigestión. El carbono es la fuente de energía de donde se produce el metano y el nitrógeno es usado para producir nuevas células, además existen muchos intervalos para la relación carbono nitrógeno según las necesidades del proceso (Varnero, 2011), como se nota en la tabla 3.

Tabla 3: Ventajas de la relación Carbono -Nitrógeno (C/N)

C/N ELEVADO	C/N BAJO
<ul style="list-style-type: none"> • Alta producción de CO₂ • Baja temperatura • Baja producción por poco desarrollo de bacterias para relaciones superiores a 35:1 	<ul style="list-style-type: none"> • Se acidifica la mezcla • Olores desfavorables • Inhibe la producción bacteriana para relaciones inferiores a 8:1

Fuente: (Varnero, 2011)

Sólidos totales: (ST) el valor de los sólidos totales es importante para saber con exactitud cuál debería ser la proporción del agua a utilizar en el proceso de digestión. (Varnero, 2011, pág. 36)

Sólidos volátiles: (SV) Es aquella porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta a altas temperaturas. Básicamente los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente corresponden a la proporción que se transformara en metano. (Varnero, 2011, pág. 36)

Material fecal: Material de desecho que descargan los intestinos. La materia fecal está compuesta de alimentos que no se digirieron, bacterias, moco y células del revestimiento de los intestinos. También se llama heces.

Estructura de los Biodigestores: Existen muchas variaciones en el diseño del biodigestor basados en muchos modelos, pero cuentan generalmente con las siguientes partes:

Cámara de fermentación: es el recinto que ocupa la materia orgánica y el biogás mientras se da el proceso de biodigestión y funciona como tanque de almacenamiento del mismo.

Cámara de almacén de gas: es un espacio que algunos biodigestores utilizan para almacenar el gas antes de ser extraído de forma final, haciendo de un contenedor intermedio.

Pila de carga: es el conducto por donde se ingresa la biomasa al biodigestor.

Pila de descarga: análoga a la pila de carga por esta salen los residuos de la biodigestión, los cuales pueden ser usados como abono orgánico o bioabono.

Agitador: mezcla la materia orgánica para que se mantenga homogénea.

Tubería de gas: es la salida del biogás puede ser de múltiples materiales debido a las propiedades del gas que no presenta altas temperaturas ni presiones, su función es transportar el biogás para su uso.

Digestión anaeróbica para la producción de biogás: la fermentación o biodigestión se da dentro de la cámara de fermentación desde el momento de la carga, el biogás es en un 99% metano y dióxido de carbono y estos son los desechos que producen las bacterias fermentativas (Yank et al., sf), Guevara 1996). El proceso anaeróbico ocurre en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetanogénesis, y metanogénesis, las cuales ocurren simultáneamente e interrelacionadas unas con las otras como describe la *figura 4* (Vargas 1992; Guevara 1996; Hilbert 2003), (Ramón et al. 2006).

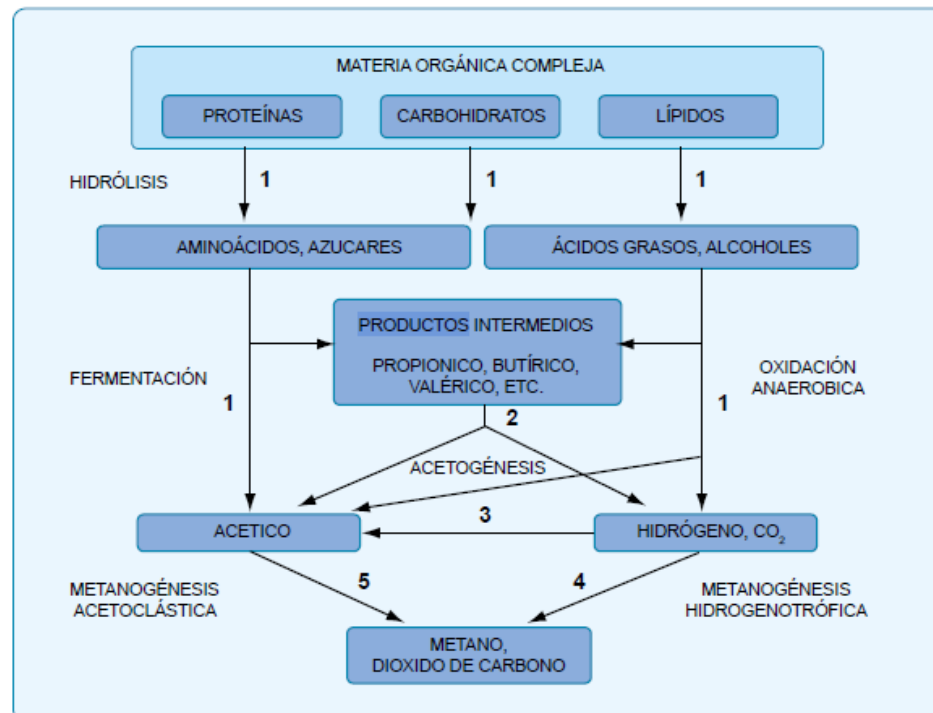


Figura 4: esquema del proceso de biodigestión

Fuente:(Varnero et al., 2011)

3.5. APLICACIONES DE LOS BIODIGESTORES

Los biodigestores son reactores donde se produce principalmente metano (CH_4), y sus aplicaciones se basan en el uso de este gas combustible, los cuales no solo presentan un potencial energético, sino que también genera un efecto de minimizar la contaminación de efecto invernadero al disminuir la cantidad de metano que se libera al ambiente, ya que es utilizado como combustible y se libera CO_2 y agua.

Uno de los principales consumos de energía en un hogar es empleada en la cocina, en donde el biogás producto de desechos orgánicos como estiércol y residuos agrícolas, permiten abastecer a familias de combustible para sus cocinas, reemplazando la quema ineficiente de combustibles sólidos los cuales generan gases que son responsables de los problemas de salud respiratorias a los que se les atribuye 3.8 millones de muertes prematuras anualmente a nivel mundial (Pradhan et al., 2019)

Otro tipo de aplicaciones del biogás están enmarcadas hacia los motores de combustión interna, en donde los motores de combustión interna encendidos por chispa presentan una gran aplicabilidad para trabajar con este tipo de combustibles, en donde al modificar las relaciones de compresión y los tiempos de encendido se ha logrado mejorar la eficiencia de estos motores alimentados con biogás con contenido de alrededor de 56% de metano (Hotta et al., 2020).

Otro avance que se ha dado en el uso del biogás como combustible para vehículos es la inclusión de los procesos de compresión y licuefacción los cuales facilitan el transporte de este tipo de combustibles además de aumentar la densidad de energía del mismo lo abre las puertas a su uso en motores de carga (Gustafsson et al., 2020). Si hablamos de motores diésel, también se ha investigado sobre su uso en estos motores luego de ser

enriquecido con hidrogeno para mejorar la combustión y la eficiencia térmica (Bouguessa et al., 2020).

A pesar de los avances en el uso de biogás para motores su uso principal sigue siendo para la producción d calor y energía, donde el biogás resulta de gran provecho no solo para pequeñas plantas típicas de muchas granjas en el mundo, sino también para aplicaciones principalmente en industrias como la del pollo, lácteos, porcina y ganadera entre otras (Gustafsson et al., 2020) (Pradhan et al., 2019)(V. Iván et al., 2014)(V.-R. Iván et al., 2015)(Fazal et al., 2019).

Uno de los usos más implementados del biogás se da en zonas rurales o de difícil acceso donde no existen algunos sistemas convencionales de energía como el servicio de gas natural e incluso de electricidad, en estas zonas no interconectadas ZNI, el biogás ahora no solo visto como una fuente de energía renovable, sino que se convierte en la mejor fuente de energía para aprovechar los recursos d biomasa que abundan en estas zonas además que existen biodigestores de fácil implementación y costos más accesibles para este tipo de poblaciones(Hamid & Blanchard, 2018)(Roubík & Mazancová, 2020)(Zeng et al., 2019)(Pradhan et al., 2019).

3.6. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN

Unos de los sistemas de refrigeración por absorción más usados son los sistemas amoniaco más agua, en el cual; el amoniaco (NH_3) es utilizado como el refrigerante y el agua (H_2O) funciona como transporte. Otros sistemas conocidos en esta área son los de agua-bromuro de litio y el de agua-cloruro de litio, en los cuales, a diferencia del sistema agua con amoniaco, el agua actúa como refrigerante. Además, los otros sistemas aparte del

amoníaco funcionan como acondicionadores de aire debido a que como el agua es el refrigerante este no puede bajar de 0 °C por que se congelaría en las tuberías.

Para entender el principio que químico del sistema refrigeración por absorción, primero que todo se examina el sistema $\text{NH}_3\text{—H}_2\text{O}$ que observaremos en la figura 1. Se puede visualizar de manera inmediata que este sistema es muy parecido al sistema por compresión de vapor. No obstante, lo que lo difiere es que el compresor se ha sustituido por un abstracto mecanismo de absorción compuesto por un absorbedor, un generador, una bomba, una válvula, un regenerador y un rectificador. Una vez que la presión del NH_3 es elevada por los componentes presentados en la Figura 5 punteado dentro del rectángulo (esto es lo único que tienen que hacer), primero el amoníaco comienza a enfriarse y siguiente a eso, el condensador comienza a condensar el amoníaco, reaccionando a eso se libera el calor en los alrededores del sistema; posterior a eso, se estrangula hasta que alcance la presión del evaporador y absorbe calor del espacio refrigerado cuando fluye a través del evaporador. Así que no hay nada nuevo. A partir de ahora, se indicará lo que sucede dentro del rectángulo punteado:

El vapor de amoníaco es expulsado del evaporador y entra al absorbedor, en ese lugar se disuelve y procede una reacción química junto el agua para formar $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$. Esta reacción es exotérmica; por ende, el calor durante el proceso se libera. La gran cantidad de NH_3 que puede disolverse en H_2O es inversamente proporcional a la temperatura. Por defecto de esta acción, es indispensable mantener su temperatura lo más bajo posible y por eso enfriamos el absorbedor, por ende, esta reacción hace aumentar la cantidad de NH_3 disuelto en el agua. La solución líquida $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$, que tiene gran cantidad de NH_3 ,

se bombea luego al generador. El calor se transporta hacia la solución, proveniente de una fuente para evaporar parte de la solución. El vapor que tiene gran cantidad de NH_3 pasa por un rectificador, que cumple la función de dividir el agua y la regresa al generador. El vapor de alta presión puro de NH_3 continúa su trayecto por el resto del ciclo. Al finalizar la solución con alta temperatura de $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$, mínima en NH_3 , continua su recorrido por el regenerador donde envía una fracción de su calor hacia la solución enriquecida que fluye de la bomba, y para llegar a la presión del absorbedor se estrangula.

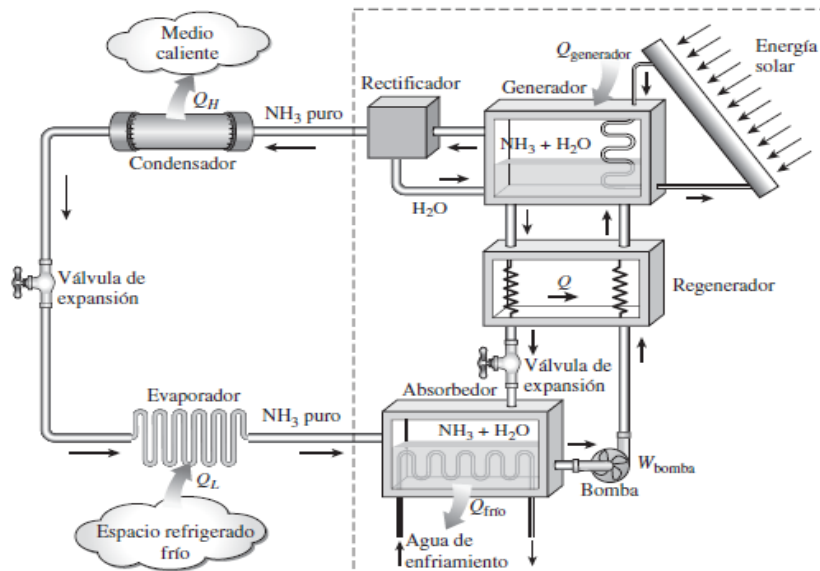


Figura 5: Esquema de un ciclo de refrigeración por absorción.

Fuente: (Çengel-7ª edición)

El fluido utilizado en el ciclo de refrigeración es una solución de agua y amoníaco (NH_3), siendo el amoníaco el refrigerante y el agua el absorbente. Para el generador requiere de una fuente de energía térmica, la cual es generalmente gas natural, propano o una resistencia eléctrica.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

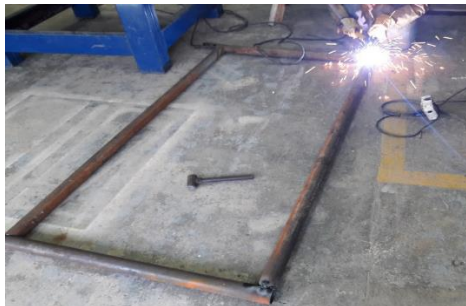
Para el desarrollo del proyecto partimos de materiales disponibles en el laboratorio de materiales y procesos del programa de ingeniería mecánica de la universidad de Córdoba, en base a los cuales realizamos cálculos para verificar su viabilidad técnica y seleccionamos aquellos que nos brindaran las propiedades necesarias para cumplir con nuestras necesidades.

4.1. MATERIALES

Para el diseño partimos de los materiales disponibles como se nota en las figuras 6 a la 9:



*Figura 6: tanque de refrigerante 410^a.
Fuente: Arkool Refrigerat*



*Figura 7: tubos de acero estructural
Fuente: propia*



Figura 8: motor 1hp

Fuente: propia

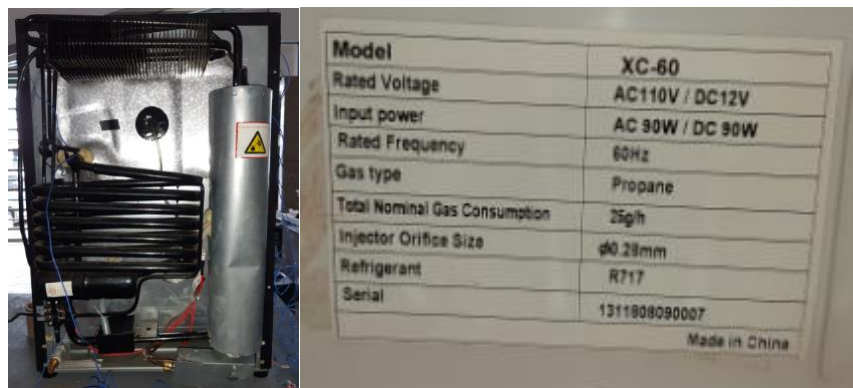


Figura 9: nevera por absorción

Fuente: propia

4.2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Para realizar este trabajo se hizo uso de algunos instrumentos de medición los cuales son presentados a continuación en las figuras 10 a la 16.

Termocuplas tipo K



Figura 10: termocupla tipo k

Fuente: propia

Manómetros de 60 psi



Figura 11: manómetro
Fuente: propia

Balanza



Figura 12: balanza digital
Fuente: propia

Baeker de 2 L



Figura 13. beaker 2 litros
Fuente: propia

Sistema de adquisición de datos datalogger Applent AT4208,



Figura 14. sistema de adquisición de datos

Fuente: propia

pH metro



Figura 15. pH metro digital

Fuente: hbquimicos.com/pH-metro-digital-portátil/

Cromatógrafo de gases



Figura 16. cromatógrafo de gases

Fuente: propia

4.3.DISEÑO Y CONSTRUCCION

Los digestores anaeróbicos rara vez se diseñan en función de la cinética del proceso, sino más bien en una combinación de carga hidráulica y orgánica, lo que puede limitar el rendimiento operativo.(Abunde Neba et al., 2020). En la teoría los biodigestores se diseñan en función de la producción necesaria

Ahora bien, para las pruebas no necesitamos trabajar con una producción continua ya que para la evaluar el funcionamiento de la nevera solo necesitamos el gas necesario para realizar las pruebas de cromatografía y de combustión del gas en el quemador de la nevera, por lo que decidimos emplear el método de producción discontinua o por baches. Para el diseño de los biodigestores decidimos utilizar materiales con los cuales contábamos de antemano y evaluar técnicamente si nos permitían cumplir con las necesidades que requeríamos, por ello partimos de tanques de refrigerante R410 los cuales tiene una capacidad de 13,3 litros, además contábamos con materiales suficientes para construir tres reactores.

Para verificar que estos tanques tuvieran la capacidad suficiente para cumplir con nuestras necesidades realizamos los cálculos para predecir la producción de biogás en base a datos de la figura 2 donde:

Tenemos que para condiciones ambientales de alrededor de 30 ° C la producción de biogás es superior a los $3,55 \text{ m}^3/\text{kg}$ para tiempos de retención de ente 30 y 40 días.

$$1\text{kg de estiercol} \rightarrow 0,355 \text{ m}^3$$

Si la densidad del metano bajo condiciones normales es $0,656 \text{ kg/m}^3$

$$1 \text{ kg de estiercol} \rightarrow 0.355 \text{ m}^3 * 0.656 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.232 \text{ kg CH}_4 \text{ por kg de estiercol}$$

Si planteamos para el biodigestor una relación de volumen de 65% biomasa y 35% espacio para almacenar el gas, con una densidad relativa aproximada de 1 para la materia orgánica tenemos que:

$$13,3 \text{ l} * 1 \text{ kg/l} = 13,3 \text{ kg de capacidad}$$

$$13,3 \text{ kg} * 0,65 = 8,645 \text{ kg de materia organica}$$

$$0.232 \frac{\text{kg biogas}}{\text{kg estiercol}} * 8,645 \text{ kg estiercol} = 2,01 \text{ kg biogas}$$

Teniendo que la nevera consume 2 g/h de propano figura 9

$$1 \text{ kg de propano} = 1 \text{ kg}_{\text{C}_3\text{H}_8} \frac{13,385 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \text{ propano}}{15,40 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \text{ metano}} = 0,869 \text{ kg metano}$$

tenemos que el biogás tiene una composición de alrededor de 60% metano.

$$25 \text{ g/h propano} = 21,725 \text{ g/h metano}$$

para el biogas dividimos por 60% y tenemos un consumo de: 36,208 g/h

$$\text{ahora tenemos que: } \frac{2005 \text{ g biogas}}{36,208 \frac{\text{g}}{\text{h}}} = 55,3 \text{ horas}$$

En base a estos cálculos decidimos que los tanques de refrigerante 410A cumplen con nuestras necesidades.

Escogimos tres (3) tanques en el cual a cada uno se le instalan tres instrumentos de medición y un visor. En los cuales se iba a medir la temperatura, presión con un termopar y manómetro respectivamente, el ultimo acceso era para la medición de pH. La función del visor es mostrar lo que está pasando dentro del biodigestor e identificar algún problema en el proceso.

ANÁLISIS DE ESCTRUCTURA

Los criterios del diseño que se usaron principalmente fue el peso que tenía cada cilindro de gas con material orgánico (12,3Kg). Este fue el criterio principal que usamos para poder desarrollar una máquina que soportara esa carga y también que pudiera girar aproximadamente 60 RPM ya se ha avanzado en muchos estudios de hacer sistemas de agitación para el proceso de biodigestión (Kuczman et al., 2018). Para el análisis de la estructura se muestra el desarrollo en las figuras 17 a la 20:

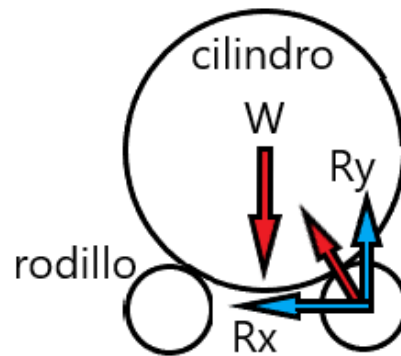


Figura 17 Diagrama de cuerpo libre Cilindro-Rodillo Plano X-Y

Fuente: propia

$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ W &= Ry_1 + Ry_2 = 0 \\ W &= R\text{sen}(30) + R\text{sen}(30) = 0 \\ W &= 120,5 \text{ N} \\ \rightarrow 120,5 \text{ N} &= 2R(\cos(30)) \\ R &= \frac{120,5}{2\cos(30)} = 67,6 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\rightarrow R_x = 67,6 \sin(30) = 30,69 \text{ N}$$

$$\rightarrow R_y = 67,6 \cos(30) = 60,25 \text{ N}$$

$$T_{total} = (R_{tanque} + R_{rodillo}) * \sin(30) * 120,5 \text{ N mm}$$

$$T_{total} = 94,80 \text{ N m} * 3$$

Cada Rodillo tiene 9,480 Nm

$$T_{total} = 28,415 \text{ N m}$$

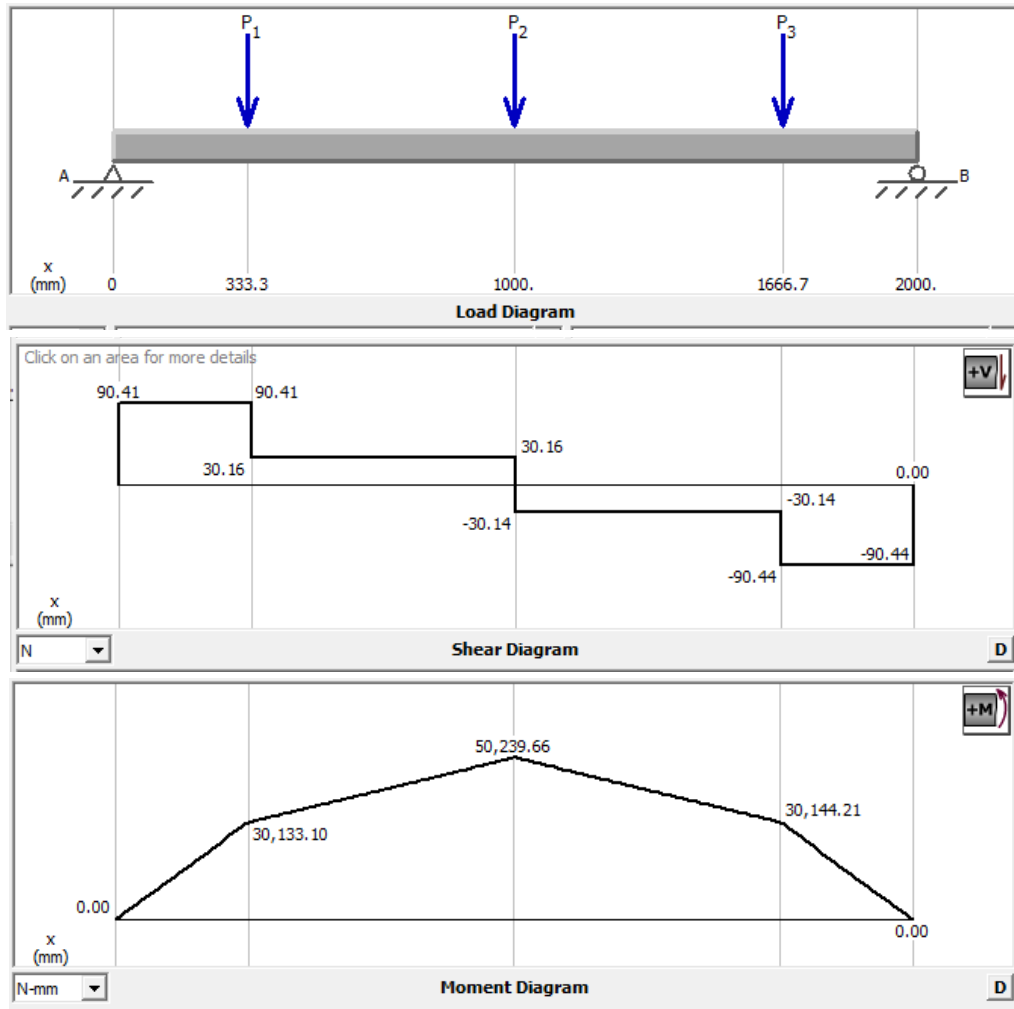


Figura 18. Diagrama de momento y fuerza del cuerpo Cilindro-Rodillo Plano X-Y

Fuente: propia

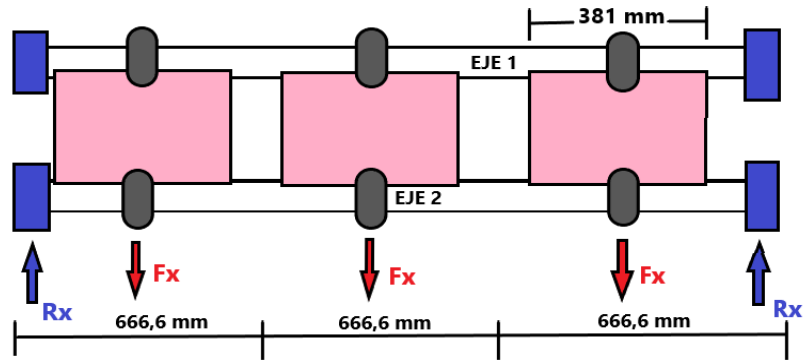


Figura 19. Diagrama de cuerpo libre Plano X-Z

Fuente: propia

$$\sum F_x = 0$$

$$Rx_1 + Rx_2 = 3 F_x$$

$$\rightarrow F_x = 30,69 \text{ N}$$

$$\rightarrow 3 F_x = 92,07 \text{ N}$$

$$\rightarrow Rx_1 = Rx_2 = R_x$$

$$\rightarrow 2R_x = 92,07 \text{ N}$$

$$R_x = 46,035 \text{ N}$$

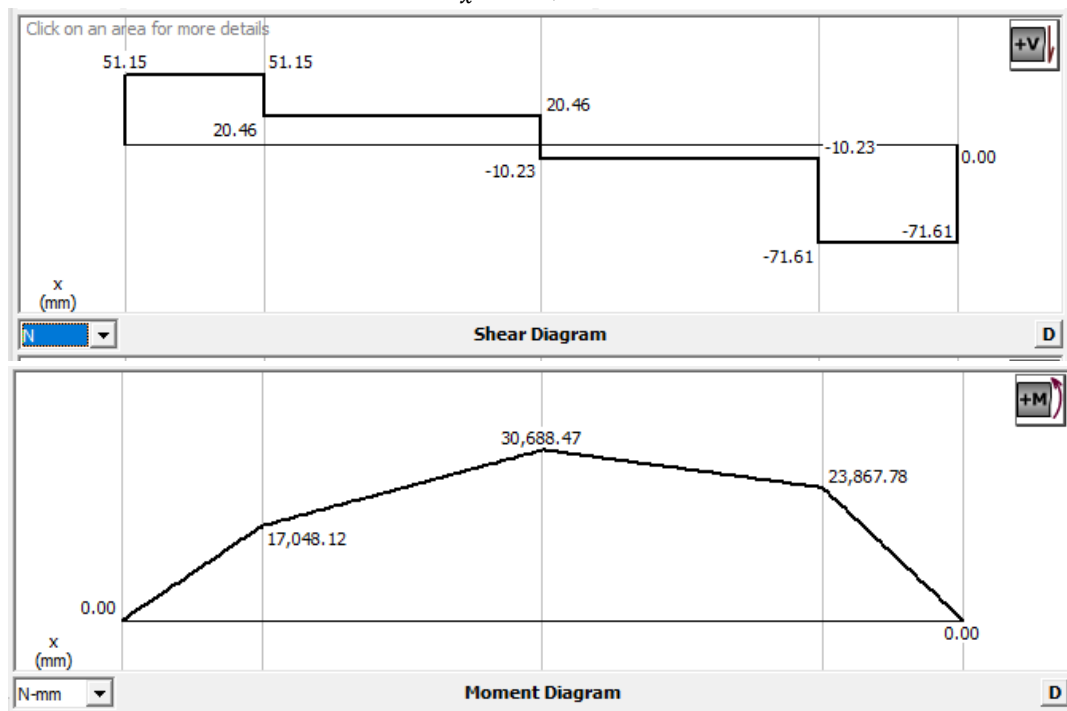


Figura 20. Diagrama de momento y fuerza del cuerpo Cilindro-Rodillo Plano X-Z

Fuente: propia

Con respecto a los diagramas anteriores, debemos analizar los diagramas de fuerza cortante, momento flector y momento torsor, además de analizar tres (3) puntos:

El primer punto nos indica el momento flector es máximo en el plano XZ (M1), el segundo punto nos muestra donde el momento flector es máximo en el plano YZ (M2) y el tercer punto donde el momento torsor es máximo en el plano YZ (Mtorsor). No obstante, en estos puntos se debe analizar el momento resultante y no su valor máximo en ese plano.

$$M_1 = \sqrt{98,49^2 + 100,4^2} = 140,3 \text{ N m}$$

$$M_2 = \sqrt{60,24^2 + 59,0^2} = 84,31 \text{ N m}$$

$$Mt = 224,61 \text{ N m}$$

Se selecciona un eje ASTM A-36 con propiedades mecánicas 250 Mpa y 400Mpa como esfuerzo de fluencia y esfuerzo ultimo respectivamente. Para los aceros usamos la ecuación (6-8) del libro del Diseño en ingeniería Mecánica de Shigley 10 edición.

$$\sigma_{R1} = \frac{32M_{R1}}{\pi d^3} = 32 * \frac{50,239}{\pi d^3} = \frac{511,63}{d^3}$$

Punto a torsión

$$T = 9.55 \left(\frac{H}{n} \right); n = 137,5 \text{ rpm}$$

$$H = 750 \text{ w}$$

$$T = 52.09 \text{ N m}$$

$$t = \frac{16T}{\pi d^3} = \frac{833,44}{d^3}$$

$$\sigma_{em} = \frac{\sigma_m}{2} + [\sigma_m^2 + \tau_m^2]^{\frac{1}{2}} = \frac{833,44}{d^3}$$

Asumiendo acero ASTM A36

$$S_n = \frac{k_a k_b k_c k_e S'_n}{k_f}$$

$$k_a = a S_u^b \quad a = 4.15 ; b = -0.265;$$

De la literatura se puede saber que $S_u = 400 \text{ Mpa}$

$$k_a = 4.15(400)^{-0.265} = 0.84$$

$$k_b = \left(\frac{d}{7.62} \right)^{-0.107}$$

$$k_c = k_d = k_e = k_f = 1$$

$$S_n' = 0.5 S_u = 200$$

$$S_n = 0.84 * 200 * 1,24 d^{-0.107} = \frac{208,32}{d^{0.107}}$$

Asumiendo un factor de seguridad de $n = 3$ y utilizando la teoría de Goodman

$$\frac{\sigma_{ea}}{S_e} + \frac{\sigma_{em}}{S_u} = \frac{1}{n}$$

$$\rightarrow \frac{\frac{511,63}{d^3}}{\frac{208,32}{d^{0.107}}} + \frac{\frac{833,44}{d^3}}{400 \times 10^6} = \frac{1}{3}$$

$$\rightarrow d = 18.3 \text{ mm}$$

SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

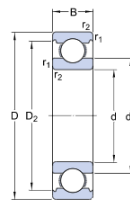
Para la selección de rodamiento se tiene en cuenta el diámetro del eje ya que este es el diámetro mínimo permitido que debe llegar a tener para soportar la carga durante el movimiento y contacto con los tanques, proseguimos a verificar si los rodamientos seleccionados cumplen con la carga máxima y usamos rodamiento **SKF 16004** que supera las cargas requeridas y además cumple con las dimensiones del eje ya que lo supera como se nota en la figura 21.

$$R_1 = \sqrt{177,3^2 + 180,7^2} = 253 \text{ N}$$

$$R_2 = \sqrt{177,3^2 + 180,7^2} = 253 \text{ N}$$

$$C_o = f_s * Fr = 0,12 \text{ kN}$$

$$C_r = \frac{f_L * F_r}{f_n * f_H} = 0,25 \text{ kN}$$



DIMENSIONES

d	20 mm
D	42 mm
B	8 mm
d ₁	≈ 27.25 mm
r _{1,2}	min. 0.3 mm

DATOS DEL CÁLCULO

Capacidad de carga dinámica básica	C	7.28 kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	4.05 kN
Carga límite de fatiga	P _u	0.173 kN
Velocidad de referencia		38000 r/min
Velocidad límite		24000 r/min
Factor de cálculo	k _r	0.02
Factor de cálculo	f ₀	14.9

Figura 21. especificaciones de rodamiento seleccionado

Fuente: catalogo SKF

SELECCIÓN DEL MOTOR

En el taller de ingeniería mecánica se contaba con un motor de 0.75 KW de potencia el cual usamos como principal fuente de energía para el sistema de la máquina y para calcular si este motor nos funciona nos regresamos a la figura 5 donde nos encontramos que el torque que es aplicado sobre cada rodillo y que tiene resiste el peso de los tanques tienen un valor de 102,94 Nm pero se multiplica por 3 ya que son 3 rodillos es decir que seria 308,82 Nm y con la ecuación 3-44 de libro de Shigley podemos saber la potencia necesaria para que funcione todo el sistema.

Para el motor: $w = 137,6 \text{ rpm}$ lo que es igual a $7,199 \text{ rad/s}$

Si $d = 104 \text{ mm}$ y para la polea $F1 = F2 = 1998 \text{ N}$

$$T = \frac{H}{W}$$

$$H = W * T \rightarrow T = r * F = 103,9 \text{ N} * m$$

$$H = 103,9 \text{ Nm} * 7,199 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 747,9 \text{ w} \approx 0,75 \text{ kw}$$

DISEÑO DE BANDA

Para saber que banda seleccionar primero tenemos que estar al tanto del tamaño de cada una de las poleas y también de cuanta potencia y las revoluciones que nos entrega el motor, que en este caso es de 0,75KW y 1375 RPM además de que los diámetros de las poleas son 104 mm y 380 mm menor y mayor respectivamente, como se nota en la figura 22.

$$V = \frac{\pi * d * n}{12} = \frac{\pi * 4,09 * 1375 \text{ RPM}}{12} = 1472,29 \frac{\text{pies}}{\text{min}}$$

con esta V y el diametro de la polea conductora
 Tabla (17 – 12) $\rightarrow d = 4,09 \text{ in}$ y $V = 1472,29$
 \rightarrow tenemos una banda tipo A
 para saber que tipo de banda sera necesitamos saber
 la longitud del paso

$$L_p = 2C + \frac{\pi(D + d)}{2} + \frac{(D - d)^2}{4C}$$

$$C = 0.25 \left\{ \left[L_p - \frac{\pi}{2}(D + d) \right] + \sqrt{\left[L_p - \frac{\pi}{2}(D + d) \right]^2 - 2(D - d)^2} \right\}$$

Resolvemos ambas ecuaciones

$$L_p = 67,5$$

que daría aproximadamente una banda A – 66



Figura 22. Tipo de banda A-66 seleccionada

Fuente: propia

DISEÑO DE SOLDADURA

Para escoger la soldadura adecuada se hace necesario escoger el punto crítico en nuestra estructura y en este caso sería la placa que va a soportar el peso de los rodillos de los tanques y movimiento y la polea como se nota en la figura 23.

$$\tau = \frac{F}{2aL}$$

$$F = 361,5N + 9,8N = 371,3N$$

$$a = 7 \text{ mm}$$

$$L = 150 \text{ mm}$$

$$\tau = \frac{371,3N}{2 * 7mm * 150mm} = 0,1768Kpa$$

Se escoge una soldadura **E6011 (414, 14Mpa)** ya que superada el limete hallado



Figura 23. Parte crítica y soldadura seleccionada E6011

Fuente: propia

4.4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Se realizó una prueba experimental en la cual se llenaron los tanques hasta un 70% de su capacidad con las siguientes especificaciones para ese 70 %:

H100: la biomasa en este tanque es 100% heces bovinas

H70-CR30: la biomasa en este tanque es de 70% heces y 30% contenido ruminal bovino.

La materia orgánica se tomó en la ganadería LA PIZARRA en Montería Córdoba, y el contenido ruminal en el matadero de Frigosinu S.A de la ciudad de Montería como se nota en la figura 24.



Figura 24. contenido ruminal y heces bovinas respectivamente

Fuente: propia

El volumen total del tanque después de las modificaciones es de 14,37 litros, como el 65% será para la materia orgánica tenemos que el volumen ocupado por la materia orgánica es 9,34 litros. Se procedió pesando en una balanza utilizando un Baker de 2 litros el contenido ruminal y las heces ver figura 25. Y los resultados se muestran en la tabla 4, el registro de cada pesa puede encontrarse en el anexo 3.

Tabla 4: contenido de materia orgánica en cada reactor

Tanque	Masa kg H	Masa kg CR	Volumen L
H100	9,314	0	9,30
H70-CR30 I	6,565	2,800	9,30
H70-CR30 II	6,570	2,820	9,30

Fuente: propia



Figura 25. Carga del biodigestor

Fuente propia

Los tanques se montaron en el sistema de agitación (ver anexo 1) durante un periodo de 41 días. Monitoreando las variables de presión, temperatura y pH.



Figura 26. monitoreo del proceso de biodigestión muestra, respectivamente los elementos para medición de temperatura, presión y pH

Fuente propia

La metodología de la toma de datos consistió en tomar datos de presión, temperatura, y muestras para medir el pH cada tres días, para lo cual se detuvo la agitación en un periodo de tiempo de alrededor de 15 a 20 minutos, donde se tomaron las muestras en el orden de pH, presión y temperatura. El pH se midió en muestras que se extrajeron a través de la

válvula, las cuales se almacenaron a baja temperatura hasta que se realizaba posteriormente su medición, la presión se midió directamente del manómetro instalado en la tapa del tanque y para la temperatura se conectó la termocupla al sistema de adquisición de datos y se esperó entre 1 y 3 minutos a que la lectura se estabilizara, luego de finalizado el proceso se realizaron las cromatografías y las pruebas con el biogás.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por lo general se ha avanzado en el estudio de biodigestores para tener una energía renovable alterna y también para reducir la contaminación emitida por el CH₄ producido por la materia orgánica. Los avances más significativos que se han realizado en este proceso se han tomado en zonas frías, lo que afecta la comparación y los resultados del proceso. No obstante, la temperatura cumple una función muy importante ya que la biodigestión debe estar en un rango mesofílico (20°-45°) para que aumente su producción. Partiendo de esta premisa, sabemos que en ciudades de clima frío se les hace difícil hacer uso de esta energía ya que necesitan suministrarle energía para poder calentar el biodigestor o que la curva de producción puede llegar a estancarse por el cambio de estaciones. En una granja lechera de Ontario-Canadá se hizo un estudio llamado “*Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant*” de la revista *Bioresource Technology Volume 216* del mes de Septiembre del año 2016 (Baldé et al., 2016) donde se midieron muchas variables, entre las cuales está la temperatura y pH que podemos comparar sabiendo la premisa que en este estado de Canadá hay diferentes estaciones que hacen que cambie la temperatura. Primero se tomaron los registros de las variables de presión temperatura y pH durante el periodo de prueba y se obtuvo que la presión en los tanques H70-CR30 durante toda la prueba presentaron un valor mayor que para el tanque con la muestra H100.

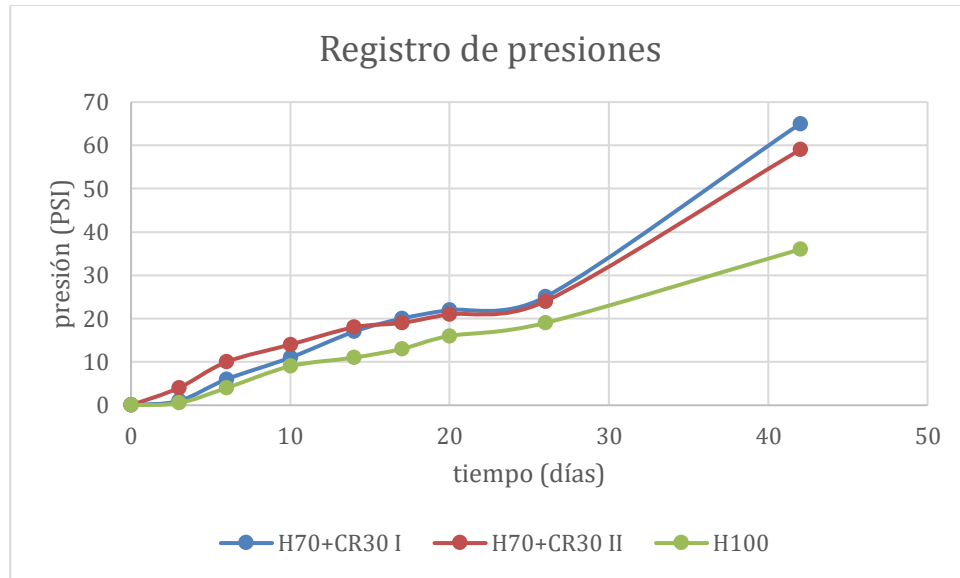


Figura 27. grafica de tiempo en días y presión en psi

Fuente: propia

Las mediciones de presión presento una tendencia bastante lineal que en promedio dio un aumento de presión diario para el tanque 1 de 1,58 psi, para el tanque 2 de 1,44 psi y para el tanque de H100 de 0,88 psi. Como la presión está directamente relacionada con la producción, podemos decir que la mezcla de contenido ruminal y heces bovinas presenta una mayor producción de biogás que para la materia orgánica conformada solamente por heces como lo muestra la figura 27.

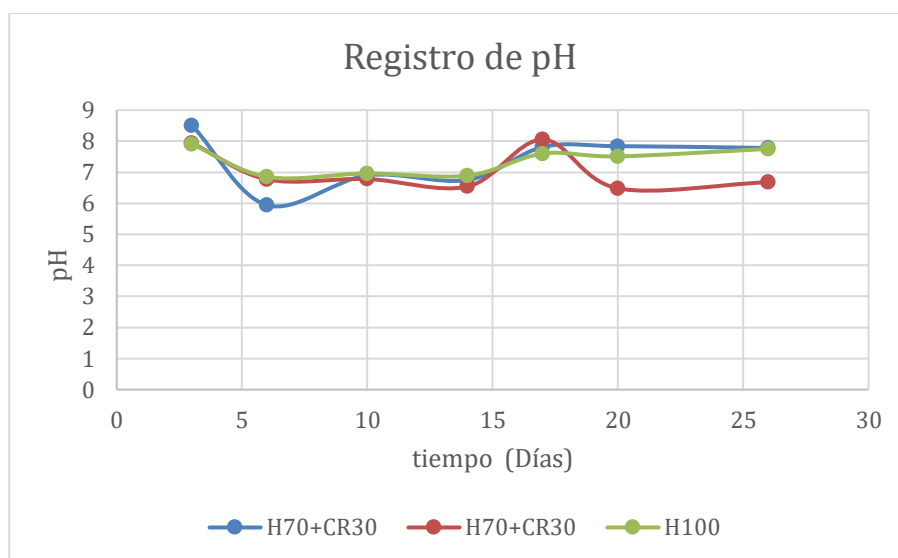


Figura 28. grafica de los pH registrados durante la prueba de producción

Fuente: propia

Lugar de muestreo de estiércol	Parámetros		
	Materia seca (g kg ⁻¹)	Sólidos volátiles (g kg ⁻¹)	pH
Estiércol crudo en granero	121.1 ± 28	100.9 ± 24	7.4 ± 0.4
Materias primas en pasteurizador	118.7	110.9	5.5
Materias primas en hidrolizador	133.5	123.3	5.9
Digestato dentro del digestor	58.0 ± 5	42.0 ± 3	6.7 ± 0.2
Columna de almacenamiento de tierra	39.6 ± 6	26.4 ± 5	7.3 ± 0.3
Superficie de almacenamiento de tierra	38.7 ± 3	25.3	7.5 ± 0.1
Capa de lodo	229.0	86.0	7.8

Figura 29. Propiedades del estiércol crudo basado en muestras tomadas dentro del establo principal, de la biomasa para las muestras tomadas dentro del digestor y del almacenamiento de tierra en el perfil vertical completo y de la superficie.

Fuente : Bioresource Technology, Volumen 216.

Del registro de pH se notó que al inicio se produce una acidificación producto de la actividad bacteriana ácido génica y que luego se produce una neutralización y posterior alcalinización teniendo un pico alrededor de los 17 días y luego una neutralización final, todo esto es reflejo de la actividad biológica dentro de los tanques ver figura 28. Y se compara con el estudio donde observamos que desde que se toma la muestra hasta el fin del proceso hay una variación razonable, porque comienza con un pH de 7.4, luego disminuye con un pH de 5.9 y luego aumenta a 7.3 que no llega lo suficiente para lo inicial que es hasta donde se aproxima la forma de tomar los datos.

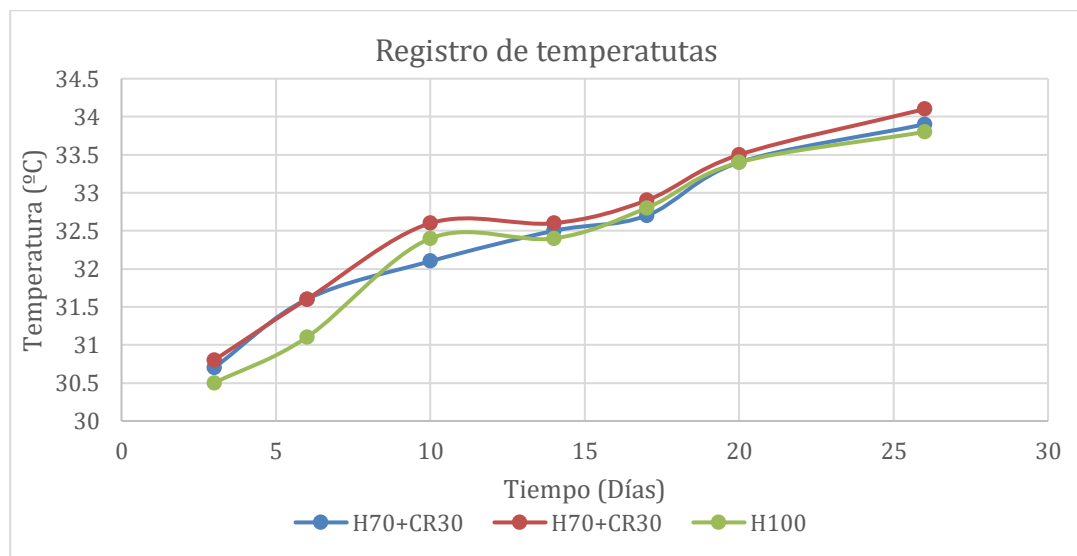


Figura 30. registro de las temperaturas dentro del sistema

Fuente: propia

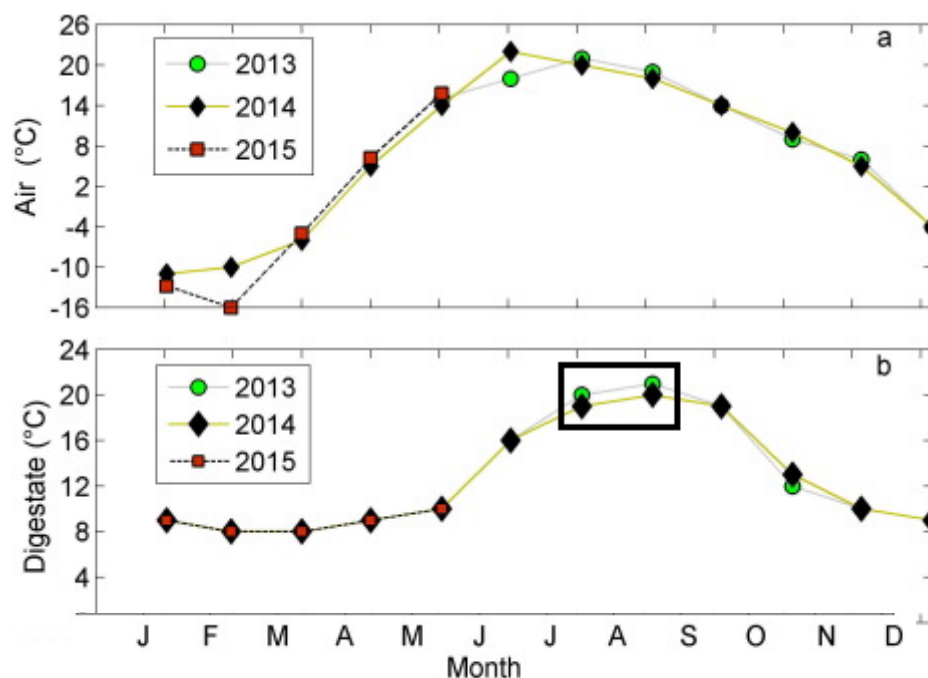


Figura 31. Temperatura media mensual del aire; b) Temperatura promedio mensual de digestato.

Fuente: Bioresource Technology, Volumen 216.

De la temperatura podemos ver que presenta un aumento constante producto de las reacciones exotérmicas características del proceso de biodigestión, lo cual es indicador de la actividad biológica ver figura 29. No obstante, haciendo la comparación con la Figura 29^a se puede ver que en los meses julio y agosto se encuentra el pico de temperatura de biogás y es porque hay un aumento de temperatura del aire, en ese dominio comparamos la variación de temperatura con nuestros datos y en ambos se nota que el aumento fue de 5° aproximadamente, lo cual concuerda con nuestro análisis.

PROPIEDADES DEL GAS.

Al gas producido se le realizaron cromatografías (ver anexo 4 al 6) para analizar la composición y el contenido de metano realizando dos cromatografías al gas de cada tanque y a un gas patrón de gas natural vehicular con un contenido de metano de 97,8% donde se obtuvo ver tablas 5 a la 11:

Tabla 5: Porcentaje de metano para biogás y el gas patrón

cromatografía	Área CH4 mV*sec	% CH4
H70-CR30	262,732	58,378
H100	237,847	52,849
PATRON	441,519	98,104

Fuente: Propia

Composición H70-CR30:

Tabla 6. Composición biogás de muestra H70-CR30.

componente	formula	%
metano	CH4	58,378
Bióxido de carbono por diferencia	C02	41,622

Fuente: Propia

Composición H100:

Tabla 7. Composición biogás de muestra H100.

componente	formula	%
metano	CH4	52,849
Bióxido de carbono por diferencia	C02	47,151

Fuente: Propia

Composición gas patrón (gas natural vehicular en Colombia gases del caribe)

Tabla 8. Composición del gas patrón.

Componente	Formula	Composición Porcentaje Molar (%)
Metano	CH ₄	98,104
Nitrogeno	N ₂	14,359
Dioxido de carbono	CO ₂	0,1113
Etano	C ₂ H ₆	0,2472
Propano	C ₃ H ₈	0,0568
Agua	H ₂ O	0
Sulfuro de Hidrogeno	H ₂ S	0
Hidrogeno	H ₂	0
Monoxido de carbono	CO	0
Oxigeno	O ₂	0
i-Butano	C ₄ H ₁₀	0,0175
n-Butano	C ₄ H ₁₀	0,0069
i-Pentano	C ₅ H ₁₂	0,0066
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	0,0014
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	0,0124
n-Heptano	C ₇ H ₁₆	0
n-Octano	C ₈ H ₁₈	0
n-Nonano	C ₉ H ₂₀	0
n-Decano	C ₁₀ H ₂₂	0
Helio	He	0
Argón	Ar	0
	TOTAL	100

Fuente: GASES DEL CARIBE

Tabla 9. Propiedades del gas patrón.

Gravedad específica real de la mezcla, a condiciones estándar:	0.5644
Poder calorífico bruto real, (@Pb y Tb), a 14.65 psia y 60°F:	997.1 BTU/pc
Densidad (Kg/m3):	0.688073
Estos parámetros aplicarán a partir del:	1 de Febrero de 2015

Fuente: GASES DEL CARIBE

Balances estequiométricos para reacciones de combustión

Tabla 10. Balance estequiométrico para la combustión del biogás.

MUESTRA	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	PRODUCE	CO ₂	H ₂ O	N ₂
H70-CR30	0,584	0,416	1,168	4,390	→	1	1,168	4,390
H100	0,528	0,472	1,057	3,974	→	1	1,057	3,974

Fuente: Propia.

Poderes caloríficos

Tabla 11. Propiedades de la combustión del biogás obtenidas por el software ASPEN

HYSYS.

biogás	Poder calorífico LHV kJ/kg	Temperatura de flama adiabática ° C
H100	15,11	1812
H70-CR30	16,93	1834

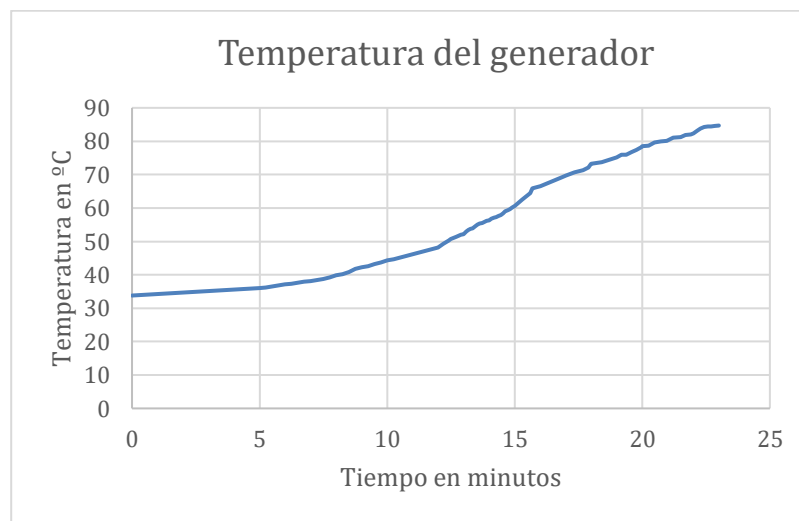
Fuente: Propia.

Evaluación como fuente de energía.

Se evaluó el potencial energético empleando un sistema de refrigeración por absorción de con refrigerante agua amoníaco en donde se utilizó una termocupla tipo k para medir la temperatura del generador mientras se utilizaba el biogás producido como gas combustible en el quemador del sistema, pero este no presentaba ninguna combustión, por lo cual fue necesario el quemar el gas de otra manera, por lo cual se procedió a instalar de forma directa la salida del biogás a la zona del quemador como lo muestra la figura 32, y utilizando un sistema de adquisición de datos medimos las temperaturas del generador durante el tiempo que el biogás permitió.



*Figura 32. Muestra de evolucionaron del Biogás en el quemador de la nevera.
Fuente: Propia.*



*Figura 33. resultados de la prueba del biogás en un sistema de refrigeración por
absorción*

Fuente: propia

Observamos que el biogás en la figura 32, presenta unas buenas características visuales de combustión por su llama azul, además obtuvimos que la temperatura del generador aumento rápidamente, por lo que podemos apreciar buenas propiedades como combustibles ver tabla 12.

Tabla 12: temperaturas para el funcionamiento de los sistemas de refrigeración por adsorción

Característica deseada	NH ₃ – Agua	LiBr – H ₂ O	MMA-Agua
Temperatura generacion	Alta (>120°C)	Media (>80°C)	Baja (>60°C)
Presion operación	Alta (10-15 bar)	Vacio (0,01)	Baja (5-7 bar)
Calor latente	Medio	Alto	Baja
Rectificacion	Si	No	Si
Eficiencia	Baja	Alto	Baja
Toxicidad	Alta	Baja	Alta
Imflamabilidad	Medio	Baja	Alta
Cristalizacion	No	Si	No
Corrosión	Baja	Moderada	Baja
Costo reactivos	Baja	Alto	Alta
Viscosidad	Baja	Baja	Baja

Fuente: Cesar A. Et al 2010

A pesar de las buenas propiedades del biogás, debido a emplear un método de quema directa y al limitado gas disponible luego de las cromatografías, y las pruebas iniciales con el quemador del sistema, el gas no fue suficiente como para que la temperatura alcanzara los 120 ° C necesarios para separar la mezcla agua amoniaco, pero debido al rápido incremento de la temperatura dentro del generador y la pendiente que esta mostraba antes del agotamiento del combustibles, y las propiedades obtenidas del gas, nos permiten decir que el generador si alcanzaría la temperatura de operación de 120 ° C, teniendo en cuenta que el incremento de la temperatura fue de 51 ° C en 23 minutos, mediante una aproximación lineal figura 34, el generador alcanzaría la temperatura de operación alrededor de los 35 minutos, además el proceso del calentamiento podemos notar que durante el corto periodo de la prueba ya había alcanzado temperaturas para operar con otros refrigerantes.

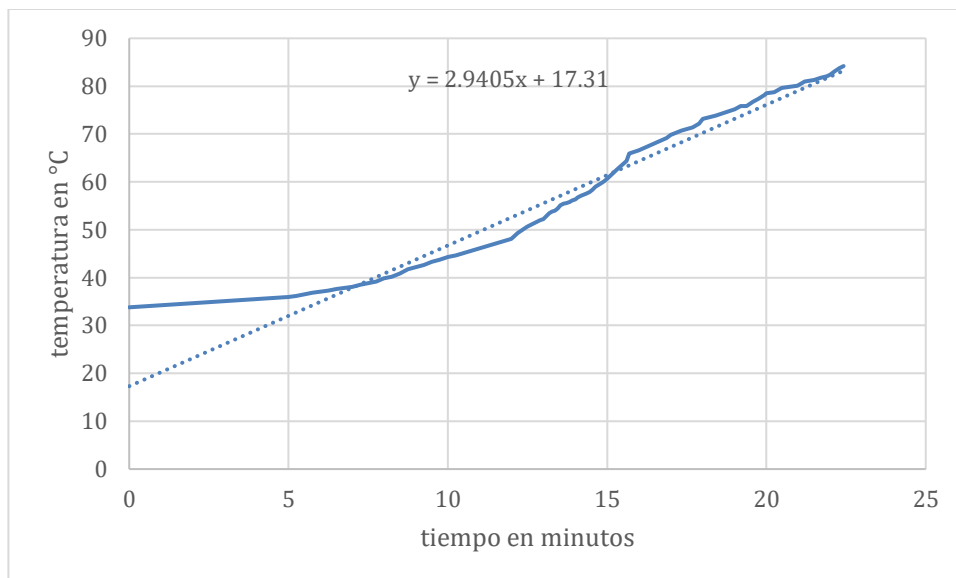


Figura 34: aproximación lineal para la gráfica tiempo temperatura

Fuente propia

6. CONCLUSIONES

Se concluye que para que un sistema de refrigeración por absorción opere utilizando un biodigestor como fuente de energía, es necesario primero que este tenga la capacidad de generación suficiente para que el equipo opere por un tiempo determinado, además tenemos que estos sistemas trabajan a presiones moderadas de alrededor de 60, las temperaturas que se manejan son relativamente bajas alrededor de los 35 °C psi, por lo que pueden ser contruidos con diversos materiales.

La biomasa es una fuente de energía alternativa que nos permite darle mayor provecho a recursos energéticos producto de actividades como la ganadería que generan biomasa, de los resultados podemos destacar que el gas producido por la mezcla H70-CR30 tiene mejores propiedades con un poder calorífico 12% mayor que la mezcla H-100, al igual que para la temperatura de flama adiabática con un 1,2 % mayor, además del registro de presiones para el día 41 en el los tanques de la mezcla H70-CR30 tuvo una presión de entre 63-80 % y fueron superiores durante todo el proceso, además de un porcentaje de metano 10,4 % mayor a la mezcla H-100, por lo cual estas materia primas tienen gran potencial para su uso en la producción de biogás.

Durante el proceso de prueba del biogás, se concluye que el quemador del sistema para gas propano, no es funcional para el biogás, por lo que este debe ser rediseñado, la combustión del biogás, mostro una llama estable de color azul como se mostró en la figura 30, pero al no tener un control de salida en la quema directa aumento el consumo de gas, por lo que el quemador para el biogás toma mucha relevancia para aplicaciones en sistemas de refrigeración por adsorción.

Se concluye que, durante las pruebas de combustión del biogás este mostro una llama estable de color azul indicativo de una buena combustión, además, el sistema teóricamente puede trabajar hasta con una eficiencia COP de 1,35 con una producción de frio de 2,43 TRF por cada tonelada de biomasa, por lo que el biogás como fuente de energía alternativa nos permite trabajar con sistemas de refrigeración por absorción e implementarlos en ZNI.

$$COP_{rev,abs} = \left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right) \left(\frac{T_L}{T_0 - T_L}\right) = 2.5$$

$$T_0 = 34^\circ, T_S = 120^\circ, T_L = 10^\circ$$

Cálculo del potencial energético

Los tanques contenían 9,3 kg de materia orgánica, estos produjeron en 41 días una presión para H100 de 36 psi y para la mezcla H70-CR30 de 65 psi aproximadamente a 34°C, este gas estaba contenido en un volumen de 5 litros, por lo que tenemos que analizando el gas con los datos de la Tabla 10 en EES (engineering equation solver) para la muestra H100 0,01434 kg de gas y para la muestra H70-CR30 una masa de gas de 0,0142 kg, tenemos que la potencia del equipo es de 90 W y el COP máximo es de 2,5 por lo que se obtienen una potencia máxima de refrigeración de 225 W de refrigeración, lo que equivale a 0,064 toneladas de refrigeración (TRF), teniendo en cuenta los poderes caloríficos de 15,11 kJ/kg y 16,93 kJ/kg, para calcular los consumos de 0,022125 kg/h para H100 y 0,01976 kg/h para H70-CR30 para un consumo eficiente del sistema, tenemos que para los 9,3 kg de la muestra H100, se obtuvieron partiendo del consumo requerido en una hora y la potencia de refrigeración que generaría el sistema trabajando de forma óptima genera, 0,04148 toneladas de refrigeración (TRF) y para la mezcla H70-CR30 de 0,0460 TRF,

por lo que para una tonelada de biomasa tendríamos 4,460 TRF para H100 y para H70-CR30 4,945 TRF para un periodo de retención de 41 días.

7. RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del proyecto se encontraron muchos puntos a mejorar, las siguientes recomendaciones están basadas en la experiencia adquirida durante el desarrollo de este trabajo de investigación:

- Para aplicaciones con sistemas de refrigeración por absorción que emplean biogás, una de las partes más importantes es el quemador debido a que como resultado de las pruebas, obtuvimos que el quemador para el gas propano no es compatible con el biocombustible obtenido por lo que resulta necesario para su correcta implementación un rediseño o un nuevo diseño para el quemador del equipo, tema el cual esperamos sea abordado en trabajos futuros.
- Para aplicaciones recomendamos utilizar biodigestión continua o semicontinua, para garantizar la operación continua del sistema de refrigeración y se recomienda el siguiente cálculo para estimar la capacidad del contenedor.

A través del poder calorífico calcular el consumo del sistema con el poder calorífico del biogás que estén trabajando en este caso usaremos los datos para biogás producto de heces bovinas H100.

$$1\text{kg de propano} = 1\text{kg}_{C_3H_8} \frac{13,385 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \text{ propano}}{15,11 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \text{ biogás}} = 0,885 \text{ kg biogás}$$

Si el consumo es de 25g/h de propano a través de esta relación calculamos el consumo con el biogás.

$$25 \frac{\text{g propano}}{\text{h}} * \frac{885 \text{ g de biogas}}{1000\text{g de propano}} = 22,125 \text{ g/h de biogás}$$

Luego de la figura 2 del documento estimar la producción en un periodo de tiempo a una temperatura dada, teniendo en cuenta situaciones como el tiempo de retención de la biomasa dentro del sistema, ejemplo en la figura 34.

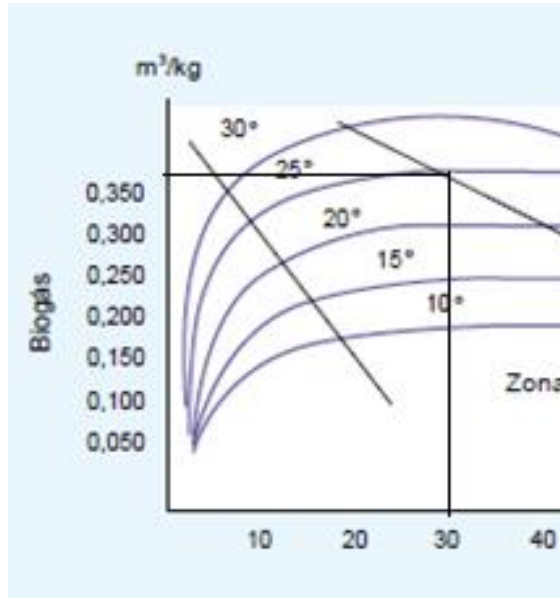


Figura. 35 selección de producción referente a la figura 2

Fuente propia

Aquí tomando una temperatura de 20 °C para un periodo de retención de 30 días tendríamos una producción por kilogramo de material orgánico de unos 0,350 m³ lo cual teniendo en cuenta una densidad de 0,656 kg/m³ tendríamos un que esto sería 0.232 kg de gas en un mes, por lo que en promedio en un día al dividir entre 30 días tenemos 0.00773 kg por día lo que es lo mismo que 7,73 g/día o 0.322 g/h por kg de materia orgánica, al dividir el consumo necesario entre la producción para un requerimiento de 22,125 g/h

$$\frac{22,125 \text{ g/h}}{(0.322 \text{ g/h) / kg}} = 68,71 \text{ kg de materia orgánica}$$

Teniendo en cuenta las fugas, poca uniformidad en la digestión de la biomasa, cambios de temperatura, además de un tiempo de retención poco certero, recomendamos que el valor de la materia orgánica en digestivo sea mayor, y este valor teórico sea tomado solo como referencia.

- Otra recomendación es sobre las mezclas de materia orgánica, en este trabajo se comprobó que algunas mezclas pueden mejorar la calidad del biogás, en este caso al usar contenido ruminal utilizamos una materia orgánica menos procesada y que por lo tanto esperábamos tener un mayor poder calorífico, además el contenido ruminal es posible realizar otras mezclas con desecho o productos residuales del comercio de alimentos como verduras en mal estado o desechos agroindustria, no solo para aprovechar estos recursos sino también porque pueden mejorar la calidad del biogás resultante como en este caso se obtuvo con el contenido ruminal y esperamos que este tema pueda ser abordado en trabajos futuros.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abunde Neba, F., Asiedu, N. Y., Addo, A., Morken, J., Østerhus, S. W., & Seidu, R. (2020). Biodigester rapid analysis and design system (B-RADeS): A candidate attainable region-based simulator for the synthesis of biogas reactor structures. *Computers and Chemical Engineering*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106607>
- Alejandro Bautista Buhigas, A. A. (2010). *Sistema de biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos*.
- Baldé, H., VanderZaag, A. C., Burt, S. D., Wagner-Riddle, C., Crolla, A., Desjardins, R. L., & MacDonald, D. J. (2016). Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant. *Bioresource Technology*, 216(2016), 914–922. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.031>
- Bouguessa, R., Tarabet, L., Loubar, K., Belmrabet, T., & Tazerout, M. (2020). Experimental investigation on biogas enrichment with hydrogen for improving the combustion in diesel engine operating under dual fuel mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 9052–9063. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.003>
- El, F. P. (n.d.). *Fundamentos para el diseño de biodigestores*.
- Fazal, T., Saif ur Rehman, M., Mushtaq, A., Hafeez, A., Javed, F., Aslam, M., Fatima, M., Faisal, A., Iqbal, J., Rehman, F., & Farooq, R. (2019). Simultaneous production of bioelectricity and biogas from chicken droppings and dairy industry wastewater employing bioelectrochemical system. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115902>
- Gustafsson, M., Cruz, I., Svensson, N., & Karlsson, M. (2020). Scenarios for upgrading and distribution of compressed and liquefied biogas — Energy, environmental, and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120473>
- Hamid, R. G., & Blanchard, R. E. (2018). An assessment of biogas as a domestic energy source

- in rural Kenya: Developing a sustainable business model. *Renewable Energy*, 121, 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.032>
- Hotta, S. K., Sahoo, N., Mohanty, K., & Kulkarni, V. (2020). Ignition timing and compression ratio as effective means for the improvement in the operating characteristics of a biogas fueled spark ignition engine. *Renewable Energy*, 150(x), 854–867. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.145>
- Iván, V.-R., Melitón, E.-J., José, M.-R., & Agustina, O.-S. (2015). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.012>
- Iván, V., José, M., Melitón, E., & Agustina, O. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I : excretas de ganado bovino y porcino Biogas and Power Generation Potential. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(14\)70352-X](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(14)70352-X)
- Kuczman, O., Gueri, M. V. D., De Souza, S. N. M., Schirmer, W. N., Alves, H. J., Secco, D., Buratto, W. G., Ribeiro, C. B., & Hernandes, F. B. (2018). Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 196, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.282>
- Pradhan, B. B., Limmeechokchai, B., & Shrestha, R. M. (2019). Implications of biogas and electric cooking technologies in residential sector in Nepal – A long term perspective using AIM/Enduse model. *Renewable Energy*, 143(2019), 377–389. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.026>
- Roubík, H., & Mazancová, J. (2020). Suitability of small-scale biogas systems based on livestock manure for the rural areas of Sumatra. In *Environmental Development* (Vol. 33). <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100505>
- Sanches, De, F., De, C., Física, L. A., Del, Y., Carmen, D., & Calvo, O. (2016).
OBTIMIZACIÓN DE LA AGITACIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO MEDIANTE

MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.

- Siddiqui, S., Zerhusen, B., Zehetmeier, M., & Effenberger, M. (2020). Distribution of specific greenhouse gas emissions from combined heat-and-power production in agricultural biogas plants. *Biomass and Bioenergy*, 133(January).
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105443>
- Taviz, E. P. (2010). *Diseño de un biodigestor para desechos orgánicos de origen vegetal*.
- Varnero, FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF. (2011). Manual del Biogás. *Proyecto CHI/00/G32*, 120. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Zeng, Y., Zhang, J., & He, K. (2019). Effects of conformity tendencies on households' willingness to adopt energy utilization of crop straw: Evidence from biogas in rural China. *Renewable Energy*, 138, 573–584. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.003>

9. ANEXOS

Anexo 1. Sistema de agitación



Anexo 2. tanques de biodigestión



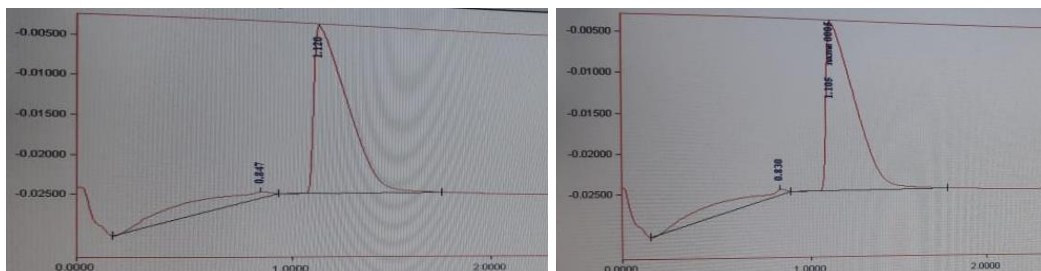
Anexo 3. Recolección del material orgánico en las instalaciones de Frigosinu S.A.



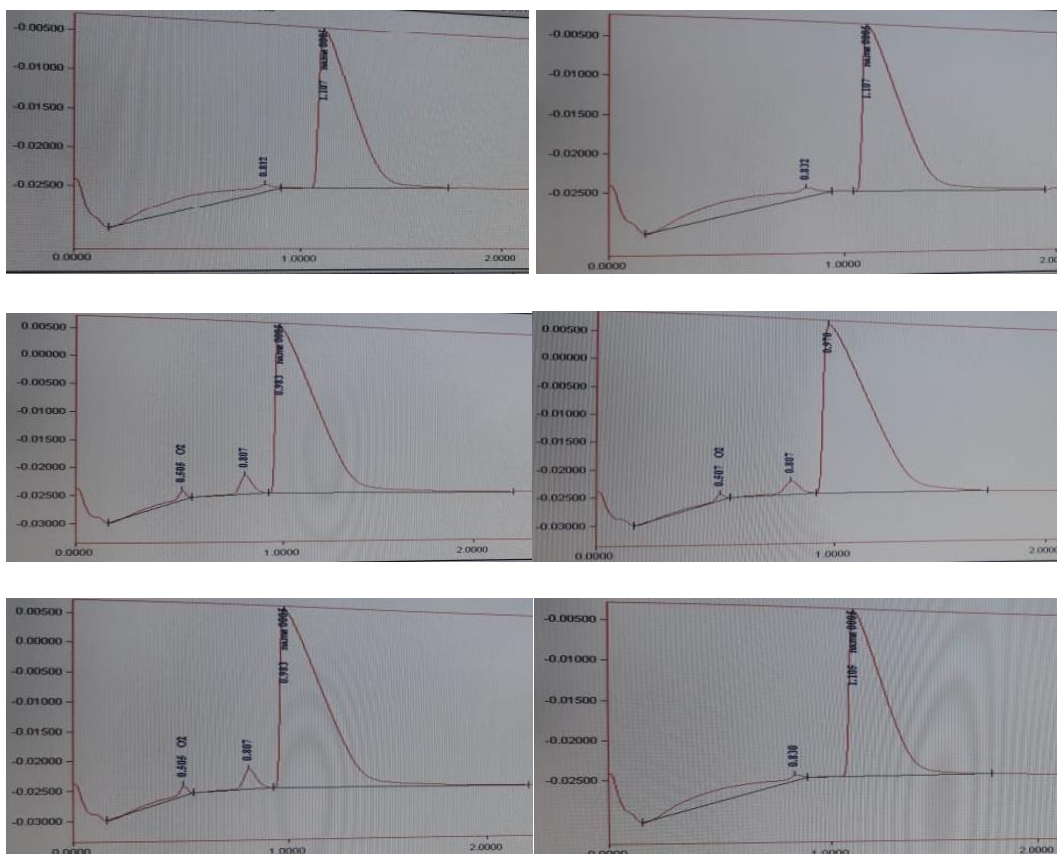
Anexo 4. Datos de la masa y volúmenes tomados durante la carga de los tanques.

Tanque	kg de H	Kg de CR	volumen L de H	volumen L de CR	masa total kg	volumen total L
H100	2,014	-	2	-	9,314	9,3
H100	1,970	-	2	-		
H100	2,030	-	2	-		
H100	1,985	-	2	-		
H100	1,315	-	1,3	-		
H70-CR30 I	2,030	-	2	-	9,365	9,3
H70-CR30 I	1,035	-	2	-		
H70-CR30 I	1,955	-	2	-		
H70-CR30 I	0,545	-	5	-		
H70-CR30 I	-	1,995	-	2		
H70-CR30 I	-	0,805	-	0,8	9,39	9,3
H70-CR30 II	2,000	-	2	-		
H70-CR30 II	2,035	-	2	-		
H70-CR30 II	1,955	-	2	-		
H70-CR30 II	0,545	-	0,5	-		
H70-CR30 II	-	2,010	-	2		
H70-CR30 II	-	0,810	-	0,8		

Anexo 5. Graficas de las cromatografías



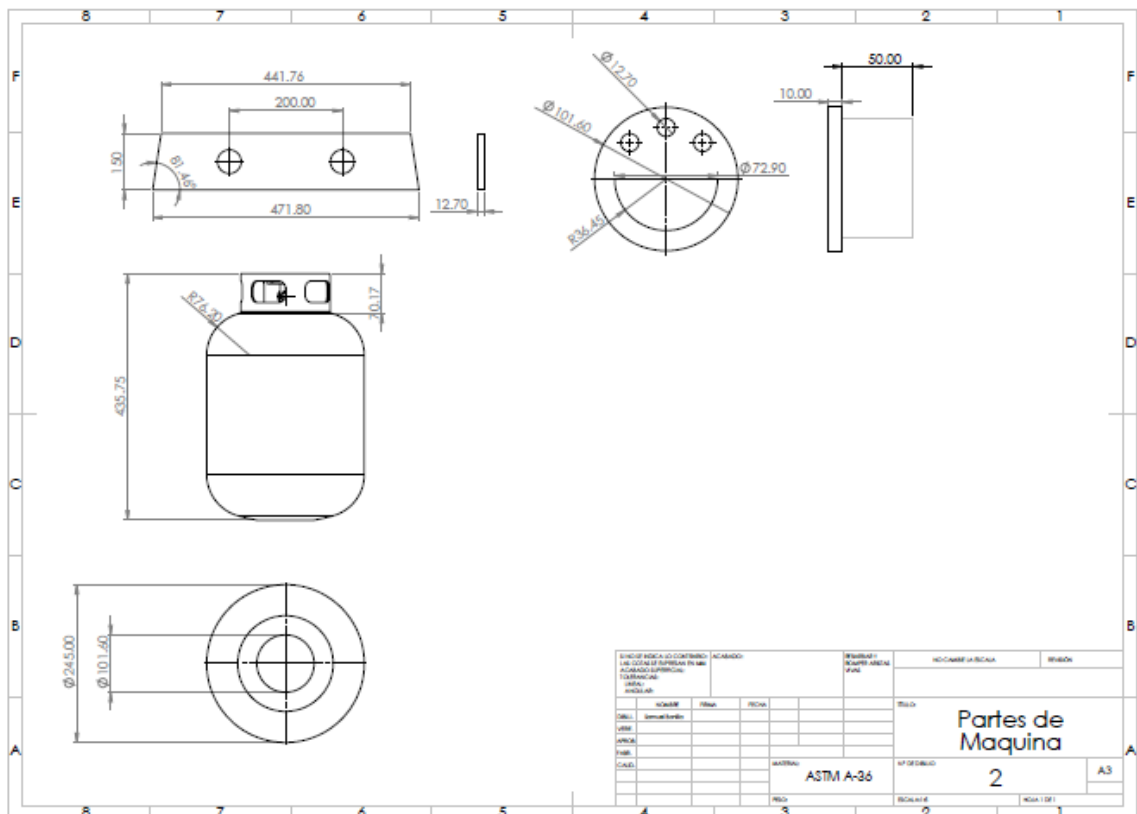
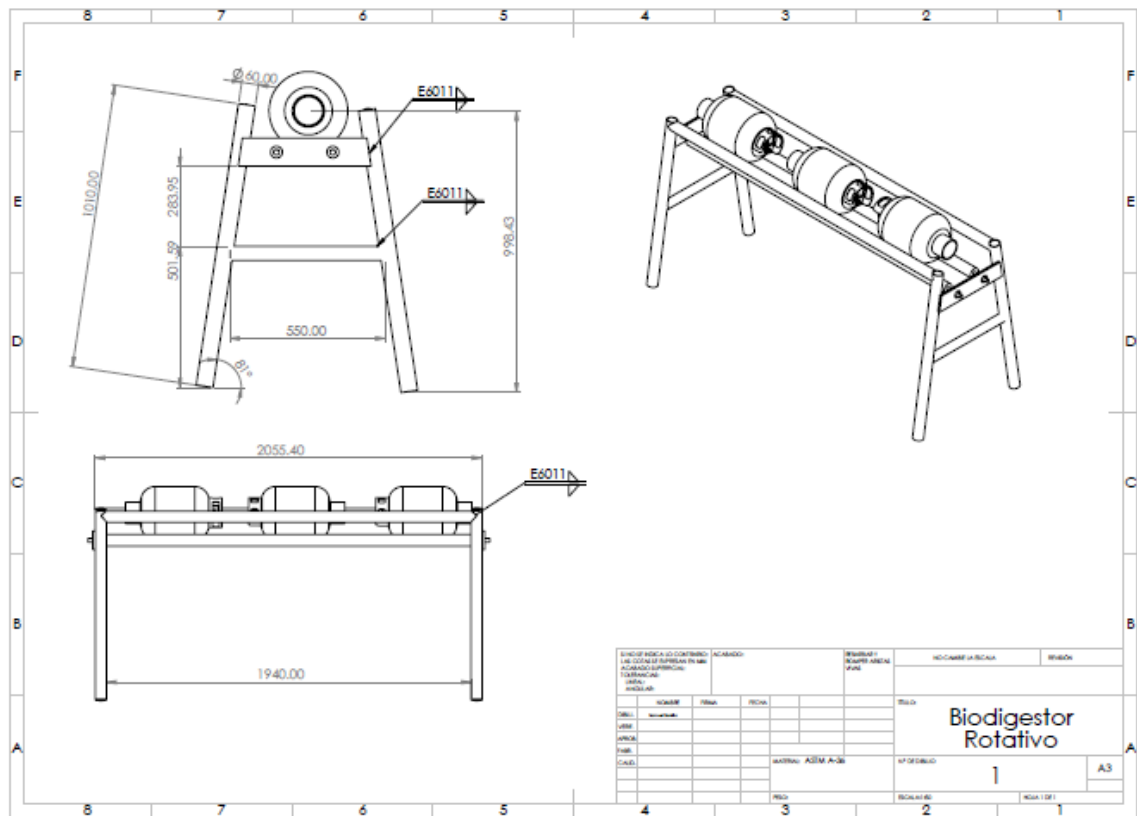
Anexo 5. Graficas de las cromatografías continuaicon



Anexo 6. Prueba de combustión de biogás.



Anexo 7. Planos del diseño.



Anexo 8. Diagrama de transmisión de potencia del motor.

